



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS MEDAN ELEKTROMAGNETIK
PADA KAKI TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS
DENGAN *FINITE-ELEMENT METHOD***

Muhammad Sulthon Novera Rega
NRP 07111440000200

Dosen Pembimbing
Danar Fahmi, S.T., M.T.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**ELECTROMAGNETIC FIELD ANALYSIS ON
ASYMMETRIC THREE-PHASE TRANSFORMER'S LEGS
USING FINITE-ELEMENT METHOD**

Muhammad Sulthon Novera Rega
NRP 07111440000200

Advisor
Danar Fahmi, S.T., M.T.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "**ANALISIS MEDAN ELEKTROMAGNETIK PADA KAKI TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS DENGAN *FINITE-ELEMENT METHOD***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018



Muhammad Sulthon Novera Rega
NRP. 07111440000200

**ANALISIS MEDAN ELEKTROMAGNETIK PADA KAKI
TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS DENGAN
FINITE-ELEMENT METHOD**

TUGAS AKHIR

**Diajukan guna Memenuhi sebagai Persyaratan
untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Daniar Fahmi, S.T., M.T.
NIP 19890925 201404 1002


Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.
NIP 19700712 199802 1001



ANALISIS MEDAN ELEKTROMAGNETIK PADA KAKI TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS DENGAN *FINITE-ELEMENT METHOD*

Nama : Muhammad Sulthon Novera Rega
Pembimbing I : Daniar Fahmi, S.T., M.T.
Pembimbing II : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Studi ini meneliti pengaruh ketebalan laminasi inti pada transformator tiga fasa asimetris terhadap kurva histerisis. Transformator tiga fasa asimetris adalah transformator yang memiliki ukuran kaki yang berbeda dengan topologi inti transformator yang diteliti menggunakan cara potong E-I berkapasitas daya 5-kVA serta ukuran kaki tengah yang lebih besar dibandingkan kaki pada sisi samping transformator. Penelitian pengaruh ketebalan laminasi inti transformator dilakukan menggunakan metode elemen hingga atau *finite-element method* (FEM) untuk mengetahui distribusi kerapatan medan magnet (B) dan intensitas medan magnet (H) pada titik-titik yang dilalui aliran distribusi fluks. Variasi ketebalan inti transformator yang digunakan pada penelitian adalah inti transformator utuh atau tanpa laminasi, inti transformator berlaminasi 2,5 cm, dan inti transformator berlaminasi 0,03 cm. Pada masing-masing transformator terdapat 39 titik monitor untuk mendapatkan nilai maksimal B dan H. Berdasarkan hasil simulasi, nilai kerapatan medan magnet terbesar berada di titik transformator dengan laminasi 0,03 cm, yaitu sebesar 2,174 V.s/m² dan kerapatan medan magnet dengan rerata absolut tertinggi berada pada transformator dengan inti tanpa laminasi, yaitu sebesar 1,837 V.s/m². Titik percabangan potongan inti transformator dengan ketebalan laminasi 0,03 cm memiliki nilai intensitas medan magnet tertinggi dibanding transformator tanpa laminasi dan laminasi 2,5 cm

Kata kunci: *finite-element method*, kerapatan medan magnet, kurva histerisis, intensitas medan magnet, transformator tiga fasa

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ELECTROMAGNETIC FIELD ANALYSIS ON ASYMMETRIC THREE-PHASE TRANSFORMER USING FINITE-ELEMENT METHOD

Name : Muhammad Sulthon Novera Rega
Advisor I : Daniar Fahmi, S.T., M.T.
Advisor II : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

ABSTRACT

This research deals with the effect of core lamination thickness on asymmetric three-phase transformer to hysteresis curve. The asymmetric three-phase transformer is a transformer that has different leg-length. The used transformer in this research has 5-kVA rating, and E-I core-cutting topology, and a larger leg size on center compared to the the side-legs of the transformer. Research on the effect of transformer core lamination thickness was done using finite-element method (FEM) to find out the magnetic field density (B) distribution and magnetic field intensity (H) at some points which the flux distribution flows. Variables of thicknesses used in the study were either intact or non-laminated-core transformer, 2.5 cm-laminated transformer core, and 0.03 cm-laminated transformer core. Each transformer has 39 monitor points to obtain the maximum value of B and H. Based on the simulation results, the highest magnetic field density value is in the transformer with 0.03 cm-laminated core, which is 2.174 Vs/m^2 and the magnetic field density with the highest absolute average is in a transformer with a non-laminated-core, which is 1.837 Vs/m^2 . At the branching point of the core-cutting of the transformer with 0.03 cm-laminated transformer core have the highest magnetic field intensity value compared to the non-laminated-core transformer and 2.5 cm-laminated.

Keyword: *finite-element method, magnetic field density, hysteresis curve, magnetic field intensity, three-phase transformer*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Penulis menyampaikan syukur dan segala puji kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

ANALISIS MEDAN ELEKTROMAGNETIK PADA KAKI TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS DENGAN *FINITE-ELEMENT METHOD*

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Allah SWT, Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Orang tua penulis, Drs. H. Achfa Machfudz, M.Si., dan Titik Rahayu yang tiada henti memberikan nasihat, semangat, doa, dan dukungan moral serta materi kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya.
3. Segenap keluarga besar Bani Deram, Bani Boenawi, serta Mas Gilang Abimantrana, S.T., dr. Nur Royhana Zulfa, dan Muhammad Sulthon Saif Al-Haq yang senantiasa mendukung dan memberi arahan serta semangat dalam pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Daniar Fahmi, S.T., M.T., dan Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian Tugas Akhir ini.
5. Mas Arief Budi Ksatria, S.T., M.T. dan Mochammad Wahyudi, S.T., M.T. yang dengan sabarnya mengajarkan ilmu serta memberikan pencerahan dalam pengerjaan Tugas Akhir layaknya dosen pembimbing.
6. Teman-teman Asisten dan Dosen Laboratorium Tegangan Tinggi yang banyak memberikan dorongan moral dan menjadi inspirasi selama pengerjaan Tugas Akhir.

7. Seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya selama proses perkuliahan di Teknik Elektro ITS.
8. Seluruh keluarga besar e-54 atas semangat dan motivasi selama 4 tahun di Departemen Teknik Elektro.
9. Seluruh sahabat penulis, khususnya penghuni Indekost Pondok Isna, jajaran *Lamis Family*, Arek Pekalongan, BEM ITS 2015/2016, dan HIMATEKTRO ITS 2016/2017 yang telah menemani perjalanan kehidupan kampus selama ini.
10. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, seperti laptop, komputer, dan properti sidang.

“Tiada gading yang tak retak”, penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran serta masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
TABLE OF CONTENT	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 SISTEM TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR ..	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik	5
2.2 Transformator	6
2.2.1 Pengertian Transformator	6
2.2.2 Prinsip Kerja Transformator	7
2.2.3 Konstruksi Transformator	8
2.2.4 Transformator Ideal	9
2.2.5 Transformator Tidak Ideal	10
2.2.6 Rangkaian Ekvivalen Transformator	11
2.2.7 Transformator Tiga Fasa.....	12
2.2.8 Kurva Magnetisasi Transformator	13
2.3 Rugi-rugi pada Transformator	15
2.3.1 Rugi Arus Eddy (<i>Eddy Current</i>)	15
2.3.2 Rugi Tembaga.....	16
2.3.3 Rugi Histerisis	16
BAB 3 SKEMA PEMODELAN TRANSFORMATOR TIGA	
FASA ASIMETRIS MENGGUNAKAN <i>FINITE-ELEMENT METHOD</i>.....	19
3.1 Spesifikasi Transformator Tiga Fasa Asimetris	19
3.2 Dimensi Inti Transformator Tiga Fasa Asimetris	20
3.3 Pemodelan Menggunakan <i>Finite-Element Method</i> (FEM)	22
3.3.1 Penggambaran Konstruksi Transformator Tiga Fasa Asimetris.....	23

3.3.2	Pengisian Parameter dan Proses Diskretisasi pada Pemodelan Transformator Tiga Fasa Asimetris	27
3.3.3	Pemilihan Lokasi Monitor Kerapatan Medan Magnet dan Intensitas Medan Magnet	27
3.3.4	Kurva Magnetisasi Material Baja ST-37	29
3.3.5	Akuisisi Data Kerapatan Medan Magnet dan Intensitas Medan Magnet terhadap Waktu pada Titik Monitor	30

BAB 4 ANALISIS HASIL SIMULASI KURVA HISTERISIS PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS ..33

4.1	Distribusi Kerapatan Medan Magnet dan Intensitas Medan Magnet	33
4.1.1	Distribusi Kerapatan Medan Magnet	33
4.1.2.1	Distribusi Kerapatan Medan Magnet pada Inti Tanpa Laminasi	33
4.1.2.2	Distribusi Kerapatan Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 2,5 cm	35
4.1.2.3	Distribusi Kerapatan Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 0,03 cm	37
4.1.2	Distribusi Intensitas Medan Magnet	39
4.1.3.1	Distribusi Intensitas Medan Magnet pada Inti Tanpa Laminasi	39
4.1.3.2	Distribusi Intensitas Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 2,5 cm	41
4.1.3.3	Distribusi Intensitas Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 0,03 cm	42
4.2	Perbandingan Kurva Histerisis dengan Variabel Ketebalan Laminasi	45
4.2.1	Kurva Histerisis pada Inti Transformator Tanpa Laminasi	45
4.2.1.1	Titik A	45
4.2.1.2	Titik B	47
4.2.1.3	Titik C	49
4.2.1.4	Titik D	50
4.2.1.5	Titik E	52
4.2.1.6	Titik F	54
4.2.1.7	Titik G	56
4.2.1.8	Titik H	57
4.2.1.9	Titik I	59
4.2.1.10	Titik J	61

4.2.1.11	Titik K	62
4.2.1.12	Titik L	64
4.2.1.13	Titik M	66
4.2.2	Kurva Histerisis pada Inti Transformator dengan Laminasi 2,5 cm	69
4.2.2.1	Titik A	69
4.2.2.2	Titik B	70
4.2.2.3	Titik C	72
4.2.2.4	Titik D	74
4.2.2.5	Titik E	75
4.2.2.6	Titik F	77
4.2.2.7	Titik G	79
4.2.2.8	Titik H	80
4.2.2.9	Titik I	82
4.2.2.10	Titik J	84
4.2.2.11	Titik K	86
4.2.2.12	Titik L	87
4.2.2.13	Titik M	89
4.2.3	Kurva Histerisis pada Inti Transformator dengan Laminasi 0,03 cm	92
4.2.3.1	Titik A	92
4.2.3.2	Titik B	94
4.2.3.3	Titik C	95
4.2.3.4	Titik D	97
4.2.3.5	Titik E	99
4.2.3.6	Titik F	100
4.2.3.7	Titik G	102
4.2.3.8	Titik H	104
4.2.3.9	Titik I	105
4.2.3.10	Titik J	107
4.2.3.11	Titik K	109
4.2.3.12	Titik L	111
4.2.3.13	Titik M	112
4.2.4	Analisis Kejenuhan Inti Transformator	116
BAB 5 PENUTUP		119
5.1	Kesimpulan	119
5.2	Saran	119
DAFTAR PUSTAKA		121
BIODATA PENULIS		123

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

TABLE OF CONTENT

<i>TITLE</i>	
<i>STATEMENT SHEET</i>	
<i>APPROVAL SHEET</i>	
<i>ABSTRAK</i>	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
<i>FOREWORD</i>	v
<i>DAFTAR ISI</i>	vii
<i>TABLE OF CONTENT</i>	xi
<i>LIST OF FIGURES</i>	xv
<i>LIST OF TABLES</i>	xix
<i>CHAPTER 1: PREFACE</i>	1
1.1 Background.....	1
1.2 Systematic of Report.....	3
<i>CHAPTER 2: ELECTRIC POWER SYSTEM AND</i>	
<i>TRANSFORMER</i>	5
2.1 Electric Power System	5
2.2 Transformer	6
2.2.1 Definition of Transformer	6
2.2.2 Principle Work of Transformer	7
2.2.3 Construction of Transformer	8
2.2.4 Ideal Transformer	9
2.2.5 Non-ideal Transformer	10
2.2.6 Equivalent Circuit of Transformer.....	11
2.2.7 Three-phase Transformer	12
2.2.8 Magnetization Curve of Transformer	13
2.3 Transformer Losses.....	15
2.3.1 Eddy Current Losses (Eddy Current).....	15
2.3.2 Copper Losses.....	16
2.3.3 Hysteresis Losses	16
<i>CHAPTER 3:MODELLING OF ASYMMETRIC</i>	
<i>THREE-PHASE TRANSFORMER USING FINITE-</i>	
<i>ELEMENT METHOD</i>	19
3.1 Three-phase Transformer Specification.....	19
3.2 Core Dimension of Asymmetric Three-phase Transformer.....	20
3.3 Transformer Modelling using Finite-Element Method	22
3.3.1 Construction Drawing of Asymmetric Three-phase Transformer	23

3.3.2	<i>Parameter and Discretization Process on Asymmetric Three-phase Transformer</i>	<i>27</i>
3.3.3	<i>Determine Monitor Location of Magnetic Field Density and Magnetic Field Intensity</i>	<i>27</i>
3.3.4	<i>Magnetization Curve of Steel ST-37 Material</i>	<i>29</i>
3.3.5	<i>Data Acquisition of Magnetic Field Density and Magnetic Field Intensity against time on Monitor Point</i>	<i>30</i>
CHAPTER 4: ANALYSIS OF HYSTERESIS CURVE RESULT ON ASYMMETRIC THREE-PHASE TRANSFORMER.....		33
4.1	Magnetic Field Density and Magnetic Field Intensity Distribution	33
4.1.1	<i>Magnetic Field Density Distribution</i>	<i>33</i>
4.1.2.1	<i>Magnetic Field Density Distribution on Non-laminated Core</i>	<i>33</i>
4.1.2.2	<i>Magnetic Field Density Distribution on 2.5 cm-laminated Core</i>	<i>35</i>
4.1.2.3	<i>Magnetic Field Density Distribution on 0.03 cm-laminated Core</i>	<i>37</i>
4.1.2	<i>Magnetic Field Intensity Distribution.....</i>	<i>39</i>
4.1.3.1	<i>Magnetic Field Intensity Distribution on Non-laminated Core</i>	<i>39</i>
4.1.3.2	<i>Magnetic Field Intensity Distribution on 2.5 cm-laminated Core</i>	<i>41</i>
4.1.3.3	<i>Magnetic Field Intensity Distribution on 0.03 cm-laminated Core</i>	<i>42</i>
4.2	Comparison of Hyteresis Curve and Thickness Lamination Variables.....	45
4.2.1	<i>Hysteresis Curve on Non-laminated Core Transformer</i>	<i>45</i>
4.2.1.1	<i>Point A.....</i>	<i>45</i>
4.2.1.2	<i>Point B.....</i>	<i>47</i>
4.2.1.3	<i>Point C.....</i>	<i>49</i>
4.2.1.4	<i>Point D.....</i>	<i>50</i>
4.2.1.5	<i>Point E.....</i>	<i>52</i>
4.2.1.6	<i>Point F.....</i>	<i>54</i>
4.2.1.7	<i>Point G.....</i>	<i>56</i>
4.2.1.8	<i>Point H.....</i>	<i>57</i>
4.2.1.9	<i>Point I.....</i>	<i>59</i>
4.2.1.10	<i>Point J.....</i>	<i>61</i>
4.2.1.11	<i>Point K.....</i>	<i>62</i>

4.2.1.12	<i>Point L</i>	64
4.2.1.13	<i>Point M</i>	66
4.2.2	<i>Hysteresis Curve on 2.5 cm-laminated Core Transformer...</i>	69
4.2.2.1	<i>Point A</i>	69
4.2.2.2	<i>Point B</i>	70
4.2.2.3	<i>Point C</i>	72
4.2.2.4	<i>Point D</i>	74
4.2.2.5	<i>Point E</i>	75
4.2.2.6	<i>Point F</i>	77
4.2.2.7	<i>Point G</i>	79
4.2.2.8	<i>Point H</i>	80
4.2.2.9	<i>Point I</i>	82
4.2.2.10	<i>Point J</i>	84
4.2.2.11	<i>Point K</i>	86
4.2.2.12	<i>Point L</i>	87
4.2.2.13	<i>Point M</i>	89
4.2.3	<i>Hysteresis Curve on 0.03 cm-laminated Core Transformer</i>	92
4.2.3.1	<i>Point A</i>	92
4.2.3.2	<i>Point B</i>	94
4.2.3.3	<i>Point C</i>	95
4.2.3.4	<i>Point D</i>	97
4.2.3.5	<i>Point E</i>	99
4.2.3.6	<i>Point F</i>	100
4.2.3.7	<i>Point G</i>	102
4.2.3.8	<i>Point H</i>	104
4.2.3.9	<i>Point I</i>	105
4.2.3.10	<i>Point J</i>	107
4.2.3.11	<i>Point K</i>	109
4.2.3.12	<i>Point L</i>	111
4.2.3.13	<i>Point M</i>	112
4.2.4	<i>Saturated Transformer Core Analysis</i>	116
CHAPTER 5: CLOSING		119
5.1	<i>Conclusion</i>	119
5.2	<i>Research Recommendation</i>	119
BIBLIOGRAPHY		121
AUTHOR BIOGRAPHY		123

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Single-Line-Diagram</i> (SLD) atau diagram segaris sistem tenaga listrik secara sederhana.....	5
Gambar 2.2	Transformator satu fasa dengan tipe inti (a); Transformator tiga fasa dengan tipe inti (b).....	8
Gambar 2.3	Transformator satu fasa dengan tipe cangkang (a); Transformator tiga fasa dengan tipe cangkang (b).	8
Gambar 2.4	Rangkaian ekivalen transformator	12
Gambar 2.5	Belitan hubungan delta (Δ) (a); Belitan hubungan wye (Y) (b).....	13
Gambar 2.6	Kurva magnetisasi transformator	14
Gambar 2.7	Inti transformator yang dibuat berlaminasi	15
Gambar 2.8	Arus Eddy pada inti material utuh (a); Arus Eddy yang telah dipecah pada inti material berlaminasi (b).....	16
Gambar 3.1	Transformator tiga fasa asimetris tampak atas (a); tampak depan (b); tampak samping (c); tampak keseluruhan	20
Gambar 3.2	Bentuk inti transformator tiga fasa asimetris	21
Gambar 3.3	Pengukuran ketebalan inti laminasi menggunakan jangka sorong	22
Gambar 3.4	Bentuk elemen tetrahedral penyusun <i>mesh</i>	23
Gambar 3.5	Letak coordinator bentuk transformator	25
Gambar 3.6	Transformator tanpa laminasi tampak atas (a); tampak samping (b)	25
Gambar 3.7	Transformator dengan tebal laminasi 2,5 cm tampak atas (a); tampak samping (b)	26
Gambar 3.8	Transformator dengan tebal laminasi 0,03 cm tampak perspektif	26
Gambar 3.9	Konstruksi tetrahedral mesh tampak depan (a); tampak perspektif (b)	27
Gambar 3.10	Titik-titik monitor pengamatan transformator kategori huruf (a); Titik-titik monitor pengamatan transformator kategori angka (b)	29
Gambar 3.11	Kurva magnetisasi material baja ST-37	29
Gambar 3.12	Contoh pengambilan data kerapatan medan magnet di titik A ₁ (a); Contoh pengambilan data intensitas medan magnet di titik A ₁ (b).....	30

Gambar 3.13	Contoh pengambilan data kerapatan medan magnet di titik A_3 (a); Contoh pengambilan data intensitas medan magnet di titik A_3 (b)	30
Gambar 4.1	Distribusi kerapatan medan magnet transformator tanpa laminasi pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h)	34
Gambar 4.2	Distribusi kerapatan medan magnet transformator berlaminasi 2,5 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h)	36
Gambar 4.3	Distribusi kerapatan medan magnet transformator berlaminasi 0,03 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h)	34
Gambar 4.4	Skala besar kerapatan medan magnet pada transformator tanpa laminasi (a); ketebalan laminasi 2,5 cm (b); ketebalan laminasi 0,03 cm (c)	39
Gambar 4.3	Distribusi intensitas medan magnet transformator tanpa laminasi pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h)	40
Gambar 4.6	Distribusi intensitas medan magnet transformator berlaminasi 2,5 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h)	42
Gambar 4.7	Distribusi intensitas medan magnet transformator berlaminasi 0,03 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h)	43
Gambar 4.8	Skala besar intensitas medan magnet pada transformator tanpa laminasi (a); dengan laminasi 2,5 cm (b); dengan laminasi 0,03 cm (c)	44
Gambar 4.9	Kurva histeresis pada titik $A1$ (a); $A2$ (b); dan $A3$ (c) transformator tanpa laminasi	46
Gambar 4.10	Kurva histeresis pada titik $B1$ (a); $B2$ (b); dan $B3$ (c) transformator tanpa laminasi	48

Gambar 4.11	Kurva histerisis pada titik C1 (a); C2 (b); dan C3 (c) transformator tanpa laminasi	49
Gambar 4.12	Kurva histerisis pada titik D1 (a); D2 (b); dan D3 (c) transformator tanpa laminasi	51
Gambar 4.13	Kurva histerisis di titik E1 (a); E2 (b); E3 (c) transformator tanpa laminasi	53
Gambar 4.14	Kurva histerisis di titik F1 (a); F2 (b); F3 (c) transformator tanpa laminasi	55
Gambar 4.15	Kurva histerisis di titik G1 (a); G2 (b); dan G3 (c) transformator tanpa laminasi	56
Gambar 4.16	Kurva histerisis di titik H1 (a); H2 (b); H3 (c) transformator tanpa laminasi	58
Gambar 4.17	Kurva histerisis di titik I1 (a); I2 (b); I3 (c) transformator tanpa laminasi	60
Gambar 4.18	Kurva histerisis pada titik J1 (a); J2 (b); J3 (c) transformator tanpa laminasi	61
Gambar 4.19	Kurva histerisis di titik K-1 (a); K2 (b); dan K-3 (c) transformator tanpa laminasi	63
Gambar 4.20	Kurva histerisis di titik L1 (a); L2 (b); dan L3 (c) transformator tanpa laminasi	65
Gambar 4.21	Kurva histerisis di titik M1 (a); M2 (b); dan M3 (c) transformator tanpa laminasi	66
Gambar 4.22	Kurva histerisis pada titik A1 (a); A2 (b); dan A3 (c) -transformator laminasi 2,5 cm.....	69
Gambar 4.23	Kurva histerisis pada titik B1 (a); B2 (b); dan B3 (c) transformator laminasi 2,5 cm.....	71
Gambar 4.24	Kurva histerisis pada titik C1 (a); C2 (b); dan C3 (c) transformator laminasi 2,5 cm.....	73
Gambar 4.25	Kurva histerisis pada titik D1 (a); D2 (b); dan D3 (c) transformator laminasi 2,5 cm.....	74
Gambar 4.26	Kurva histerisis di titik E1 (a); E2 (b); E3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	76
Gambar 4.27	Kurva histerisis di titik F1 (a); F2 (b); F3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	78
Gambar 4.28	Kurva histerisis di titik G1 (a); G2 (b); dan G3 (c) transformator laminasi 2,5 cm.....	79
Gambar 4.29	Kurva histerisis di titik H1 (a); H2 (b); H3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	81

Gambar 4.30	Kurva histerisis di titik I1 (a); I2 (b); I3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	83
Gambar 4.31	Kurva histerisis pada titik J1 (a); J2 (b); J3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	85
Gambar 4.32	Kurva histerisis di titik K-1 (a); K2 (b); dan K-3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	86
Gambar 4.33	Kurva histerisis di titik L1 (a); L2 (b); dan L3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	88
Gambar 4.34	Kurva histerisis di titik M1 (a); M2 (b); dan M3 (c) transformator laminasi 2,5 cm	90
Gambar 4.35	Kurva histerisis pada titik A1 (a); A2 (b); dan A3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	93
Gambar 4.36	Kurva histerisis pada titik B1 (a); B2 (b); dan B3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	94
Gambar 4.37	Kurva histerisis pada titik C1 (a); C2 (b); dan C3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	96
Gambar 4.38	Kurva histerisis pada titik D1 (a); D2 (b); dan D3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	98
Gambar 4.39	Kurva histerisis di titik E1 (a); E2 (b); E3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	99
Gambar 4.40	Kurva histerisis di titik F1 (a); F2 (b); F3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	101
Gambar 4.41	Kurva histerisis di titik G1 (a); G2 (b); dan G3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	103
Gambar 4.42	Kurva histerisis di titik H1 (a); H2 (b); H3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	104
Gambar 4.43	Kurva histerisis di titik I1 (a); I2 (b); I3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	106
Gambar 4.44	Kurva histerisis pada titik J1 (a); J2 (b); J3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	108
Gambar 4.45	Kurva histerisis di titik K-1 (a); K2 (b); dan K-3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	110
Gambar 4.46	Kurva histerisis di titik L1 (a); L2 (b); dan L3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	112
Gambar 4.47	Kurva histerisis di titik M1 (a); M2 (b); dan M3 (c) transformator laminasi 0,03 cm	113

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter pada rangkaian ekuivalen transformator	11
Tabel 3.1	Spesifikasi transformator tiga fasa asimetris	19
Tabel 3.2	Spesifikasi dimensi transformator tiga fasa asimetris	21
Tabel 3.3	Komposisi baja ST-37	24
Tabel 3.4	Koordinat bentuk material potongan E-I	24
Tabel 3.5	Daftar titik monitor kurva B-H	27
Tabel 4.1	Nilai B-H di titik A transformator tanpa laminasi.....	47
Tabel 4.2	Nilai B-H di titik B transformator tanpa laminasi	48
Tabel 4.3	Nilai B-H di titik C transformator tanpa laminasi	50
Tabel 4.4	Nilai B-H di titik D transformator tanpa laminasi.....	52
Tabel 4.5	Nilai B-H di titik E transformator tanpa laminasi	54
Tabel 4.6	Nilai B-H di titik F transformator tanpa laminasi	56
Tabel 4.7	Nilai B-H di titik G transformator tanpa laminasi.....	57
Tabel 4.8	Nilai B-H di titik H transformator tanpa laminasi.....	59
Tabel 4.9	Nilai B-H di titik I transformator tanpa laminasi	60
Tabel 4.10	Nilai B-H di titik J transformator tanpa laminasi	62
Tabel 4.11	Nilai B-H di titik K transformator tanpa laminasi.....	64
Tabel 4.12	Nilai B-H di titik L transformator tanpa laminasi	65
Tabel 4.13	Nilai B-H di titik M transformator tanpa laminasi.....	67
Tabel 4.14	Ringkasan nilai B-H pada transformator tanpa laminasi.....	67

Tabel 4.15	Nilai B-H di titik A transformator laminasi 2,5 cm.....	70
Tabel 4.16	Nilai B-H di titik B transformator laminasi 2,5 cm.....	72
Tabel 4.17	Nilai B-H di titik C transformator laminasi 2,5 cm.....	73
Tabel 4.18	Nilai B-H di titik D transformator laminasi 2,5 cm.....	75
Tabel 4.19	Nilai B-H di titik E transformator laminasi 2,5 cm.....	77
Tabel 4.20	Nilai B-H di titik F transformator laminasi 2,5 cm.....	78
Tabel 4.21	Nilai B-H di titik G transformator laminasi 2,5 cm.....	80
Tabel 4.22	Nilai B-H di titik H transformator laminasi 2,5 cm.....	82
Tabel 4.23	Nilai B-H di titik I transformator laminasi 2,5 cm.....	84
Tabel 4.24	Nilai B-H di titik J transformator laminasi 2,5 cm.....	85
Tabel 4.25	Nilai B-H di titik K transformator laminasi 2,5 cm.....	87
Tabel 4.26	Nilai B-H di titik L transformator laminasi 2,5 cm.....	89
Tabel 4.27	Nilai B-H di titik M transformator laminasi 2,5 cm.....	90
Tabel 4.28	Ringkasan nilai B-H pada transformator laminasi 2,5 cm	91
Tabel 4.29	Nilai B-H di titik A transformator laminasi 0,03 cm.....	93
Tabel 4.30	Nilai B-H di titik B transformator laminasi 0,03 cm.....	95
Tabel 4.31	Nilai B-H di titik C transformator laminasi 0,03 cm.....	97
Tabel 4.32	Nilai B-H di titik D transformator laminasi 0,03 cm.....	98
Tabel 4.33	Nilai B-H di titik E transformator laminasi 0,03 cm.....	100

Tabel 4.34	Nilai B-H di titik F transformator laminasi 0,03 cm	102
Tabel 4.35	Nilai B-H di titik G transformator laminasi 0,03 cm	103
Tabel 4.36	Nilai B-H di titik H transformator laminasi 0,03 cm	105
Tabel 4.37	Nilai B-H di titik I transformator laminasi 0,03 cm	107
Tabel 4.38	Nilai B-H di titik J transformator laminasi 0,03 cm	108
Tabel 4.39	Nilai B-H di titik K transformator laminasi 0,03 cm	110
Tabel 4.40	Nilai B-H di titik L transformator laminasi 0,03 cm	112
Tabel 4.41	Nilai B-H di titik M transformator laminasi 0,03 cm	114
Tabel 4.42	Ringkasan nilai B-H pada transformator laminasi 0,03 cm.....	115
Tabel 4.43	Nilai puncak arus <i>inrush</i> transformator tiga fasa asimetris berdasarkan pendekatan simulasi	117

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan salah satu peralatan mesin listrik statis yang digunakan dalam penyaluran listrik pada sistem transmisi dan distribusi. Transformator berfungsi untuk menaikkan level tegangan (*step-up*) yang dibangkitkan oleh sistem pembangkit tenaga listrik, sehingga dapat ditransmisikan pada jarak yang telah ditentukan. Selain dapat menaikkan level tegangan, transformator juga dapat berfungsi untuk menurunkan level tegangan (*step-down*) dari sistem transmisi menuju sistem distribusi agar daya listrik yang ditransmisikan dapat digunakan oleh beban-beban listrik di perkantoran, perumahan, maupun sektor industri sesuai kebutuhannya [1]. Secara sederhana, transformator terdiri dari kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti transformator.

Terdapat kemajuan yang signifikan pada pemodelan komputer atau simulasi dalam beberapa dekade terakhir, namun teknik pemodelan transformator tiga fasa tidak berkembang sebaik transformator satu fasa [2]. Kendala yang dihadapi bermacam-macam, seperti topologi transformator tiga fasa yang beragam serta penentuan parameter non-linier yang lebih kompleks [3]. Telah banyak dilakukan pemodelan transformator tiga fasa dan satu fasa [4]–[7]. Pemodelan transformator tiga fasa dengan satu inti dianggap lebih rumit akibat adanya fluks yang saling terkait antar belitan serta banyaknya parameter yang diabaikan, seperti rugi-rugi inti besi [8]. Maka dari itu, perlu dilakukan analisis mengenai distribusi dan kerapatan fluks pada inti. Besar distribusi fluks didapatkan dari simulasi berbasis *Finite-Element Method* (FEM).

Tingkat akurasi pemodelan pengoperasian transformator selama ini dirasa kurang [9]. Sehingga, pemodelan terkini membutuhkan integrasi fenomena histerisis yang telah menjadi salah satu subyek penelitian yang penting. Beberapa variasi pemodelan histeresis yang baik telah tersedia dalam literatur Jiles-Arthon (J-A), Preisach, Bouch-Wen, Tellinen, Stoner-Wohlfarth, dengan masing-masing kekurangan serta kelebihanannya. Penelitian beberapa tahun terakhir mencoba untuk mendapatkan kurva histerisis dari inti feromagnetik dari pemodelan transformator tiga fasa baik simetris maupun asimetris [10]. Pemodelan transformator menjadi hal yang penting khususnya pada perusahaan manufaktur peralatan tersebut sebagaimana dilakukannya penentuan

spesifikasi, dimensi, karakteristik mekanik, karakteristik termal, dan medan elektromagnetik.

Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi pada transformator tiga fasa dengan kustomisasi bentuk kaki yang disebut sebagai transformator tiga fasa asimetris akibat perbedaan panjang pada kakinya berbasis FEM. Hasil yang diharapkan dari pemodelan tersebut adalah bentuk kurva histerisis pada masing-masing kaki. Kurva histerisis yang dimaksud adalah perbandingan kurva B (kerapatan medan magnet) dengan kurva H (intensitas medan magnet). Analisis kurva B-H pada transformator tiga fasa menjadi tantangan karena perilaku elektromagnetiknya pada saat kondisi transien maupun *steady-state* memiliki perbedaan cukup signifikan daripada transformator satu fasa. Secara spesifik, kopling magnetik dan jalur fluks pada transformator tiga fasa yang lebih banyak menunjukkan perilaku yang berbeda dibandingkan transformator satu fasa [11]. Jarak sela udara (*air gap*) pada bagian inti transformator serta pada sambungan antarbagian inti juga mempengaruhi besar titik saturasi magnet pada transformator [12].

Permasalahan pada penelitian ini adalah pengaruh tebal laminasi pada inti transformator terhadap besar titik saturasi magnet pada transformator serta perbandingan bentuk kurva histeris pada tiap kaki dengan variasi ketebalan laminasi. Sedangkan, batasan masalah pada penelitian ini adalah transformator yang disimulasikan yakni transformator tiga fasa asimetris (kustomisasi) 380/380V 5-kVA. Batasan masalah lainnya adalah variasi ketebalan laminasi pada inti transformator, yakni tanpa laminasi atau bentuk utuh, tebal laminasi 2,5cm, serta tebal laminasi trafo sesungguhnya 0,03 cm, bentuk potongan inti E-I, material yang digunakan adalah ST-37, serta lokasi pengamatan berdasarkan *point* (titik), dan analisis medan elektromagnetik menggunakan perangkat lunak *Computer Simulation Technology* (CST) Studio berbasis FEM serta *plotting* kurva histerisis menggunakan perangkat lunak MatLAB.

Tujuan dan relevansi dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari ketebalan laminasi inti transformator terhadap besar titik saturasi magnet beserta kurva histerisisnya, sehingga diharapkan perusahaan manufaktur transformator dapat mempertimbangkan ketebalan laminasi pada inti transformator dalam proses konstruksinya. Relevansi lainnya adalah penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi mahasiswa yang berminat untuk mengerjakan penelitian dengan topik pada transformator.

Metodologi penelitian dalam penelitian ini dimulai dari pengumpulan referensi mengenai cara potong inti transformator, karakteristik material inti transformator untuk digunakan dalam studi literatur, dan teori mengenai metode FEM yang digunakan. Kemudian, dilakukan pengumpulan data hasil pengukuran transformator tiga fasa asimetris untuk kemudian dilakukan pemodelan tiga dimensi dan simulasi pada perangkat lunak CST Studio. Simulasi transformator dilakukan dengan beberapa parameter yang berbeda yaitu ketebalan laminasi inti transformator dan material yang digunakan. Setelah pengambilan data selesai, akan dilakukan analisis data hasil simulasi. Hasil yang diperoleh kemudian diolah untuk mengetahui distribusi fluks pada tiap kaki pada inti yang berbeda serta kurva histerisis pada masing-masing kaki. Terakhir adalah penarikan kesimpulan mengenai pengaruh ketebalan laminasi dan material inti transformator terhadap titik kejenuhan magnet serta saran untuk penelitian selanjutnya.

1.2 Sistematika Penulisan

Pada penelitian ini, bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi yang digunakan, sistematika penulisan, manfaat, relevansi dari penulisan pada studi ini.

Bab dua menjelaskan tentang kajian pustaka yang membahas tentang sistem tenaga listrik dan teori transformator.

Bab tiga membahas mengenai pemodelan transformator tiga fasa asimetris menggunakan simulasi *Finite-Element Method* untuk mendapatkan kurva histerisis. Dalam bab ini dijelaskan pula metode pengukuran untuk mendapatkan parameter yang digunakan pada simulasi.

Bab empat menguraikan analisis hasil simulasi terkait pengaruh ketebalan laminasi pada inti transformator beserta pemilihan material yang digunakan terhadap besar titik saturasi pada kurva histerisis.

Bab lima penelitian ini menyimpulkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

SISTEM TENAGA LISTRIK DAN TRANSFORMATOR

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber (pusat pembangkitan tenaga) ke beban (konsumen) [13]. Sistem ini terdiri dari sub-sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Tenaga listrik yang dibangkitkan oleh sumber dinaikkan level tegangannya pada sebuah gardu induk pembangkit melalui transformator *step-up* untuk kemudian disalurkan melalui sistem transmisi. Semakin jauh jarak sumber pembangkitan ke beban akan memerlukan saluran transmisi yang lebih panjang. Apabila rugi-rugi pada saluran transmisi terlampaui cukup besar, dikhawatirkan konsumen tidak mendapatkan suplai daya listrik yang sesuai. Oleh karenanya, level tegangan pada saluran transmisi berkisar antara 30 kV hingga 500 kV yang dinaikkan level tegangannya oleh bantuan transformator. Indonesia sendiri memiliki level tegangan 150 kV yang biasa disebut Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) serta Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) yang memiliki level tegangan 500 kV.

Pada saat sistem tenaga listrik beroperasi akan terdapat rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya pada sistem transmisi AC tiga fasa dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\Delta P = 3 I^2 R \quad (2.1)$$

dengan ΔP = Rugi-rugi daya pada transmisi AC tiga fasa (Watt)
 I = Arus pada kawat transmisi (Ampere)
 R = Resistansi kawat transmisi tiap fasa (Ohm)



Gambar 2.1 *Single-Line-Diagram* (SLD) atau diagram segaris sistem tenaga listrik secara sederhana [13]

Apabila mengabaikan arus kapasitif, maka arus di sepanjang kawat transmisi dapat diasumsikan memiliki besar yang sama dengan arus pada ujung penerima transmisi, dengan rumus sebagai berikut:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V_r \cos \varphi} \quad (2.2)$$

dengan P = Daya beban pada ujung transmisi (Watt)
 V_r = Tegangan fasa-ke-fasa penerima transmisi (Volt)
 $\cos \varphi$ = Faktor daya beban

Selanjutnya Persamaan (2.2) disubstitusikan ke dalam Persamaan (2.1), maka diperoleh:

$$\Delta P_t = \frac{P^2 R}{V_r^2 \cos^2 \varphi} \quad (2.3)$$

Terlihat bahwasannya rugi-rugi transmisi berbanding lurus terhadap resistansi konduktor dan berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan transmisi, sehingga pengurangan rugi-rugi yang didapatkan melalui kenaikan level tegangan transmisi jauh lebih besar daripada pengurangan rugi-rugi dari pengurangan resistansi konduktor. Atau secara sederhana, pengurangan rugi-rugi transmisi dilakukan dengan memperbesar level tegangan transmisi. Hal ini menjadi salah satu sebab tingginya level tegangan transmisi pada sistem tenaga listrik.

2.2 Transformator

2.2.1 Pengertian Transformator

Transformator diartikan sebagai peralatan mesin listrik statis yang digunakan pada sistem tenaga listrik untuk mengubah level tegangan sesuai dengan kebutuhan sistem. Sistem tenaga listrik yang kompleks akan memunculkan level tegangan transmisi dan distribusi yang beragam, sehingga disitulah transformator daya harus digunakan pada setiap titik dimana terdapat transisi antar level tegangan.

Secara garis besar, transformator terdiri dari kumparan primer, sekunder, dan material inti. Atau bisa dikatakan transformator terdiri atas dua atau lebih kumparan kawat yang membungkus inti feromagnetik. Apabila kumparan primer tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka akan menimbulkan sebuah fluks yang nilainya berubah

terhadap waktu, dimana besar amplitudonya bergantung pada level tegangan, frekuensi sumber, dan jumlah belitan.

Karena kumparan sekunder dengan primer tidak terhubung secara fisik, melainkan terhubung secara magnetik, maka dengan adanya fluks bolak-balik akan memunculkan fluks gandeng atau bersama (*mutual flux*) di antara belitan. Kemudian, fluks gandeng akan menginduksi belitan di sisi lain yang menyebabkan muncul tegangan yang besarnya juga bergantung pada frekuensi, fluks gandeng, dan jumlah belitan. Pada dasarnya, prinsip kerja transformator hanya membutuhkan keberadaan fluks yang nilainya berubah terhadap waktu tersebut yang menghubungkan belitan primer dan sekunder, sehingga menghasilkan tegangan.

Usia transformator umumnya berkisar pada tiga puluh tahun jika dioperasikan sesuai ratingnya. Usia tersebut dapat semakin pendek apabila beroperasi dalam kondisi tertentu, seperti *overload* dan pengoperasian transformator melampaui rating kerja.

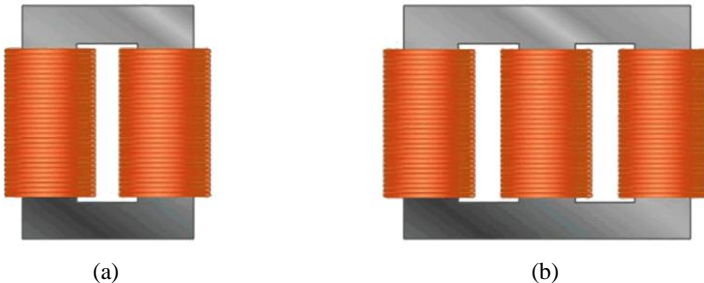
2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator dapat mengubah dan menyalurkan energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik lain melalui fluks gandeng berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Selain pada sistem tenaga, transformator juga digunakan secara baik di bidang elektronika. Keduanya memiliki prinsip kerja yang sama dan secara teknis memiliki konstruksi kerja yang sama, yaitu kumparan primer dan sekunder. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun terhubung secara magnetik melalui jalur yang memiliki tingkat reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka akan muncul fluks bolak-balik di dalam inti yang telah dilaminasi. Karena kumparan tersebut membentuk rangkaian tertutup, maka akan mengalir arus yang disebut arus primer.

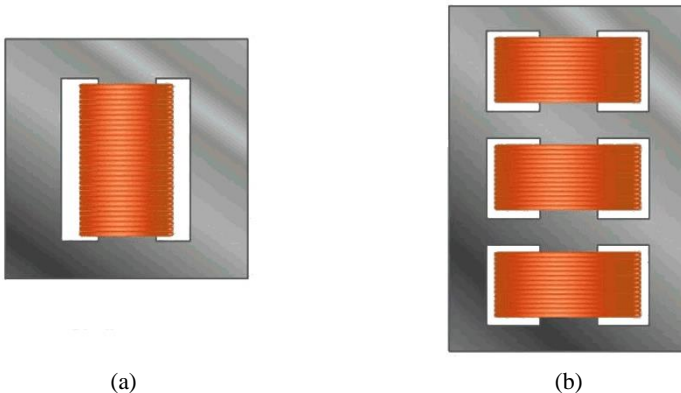
Apabila fluks sudah muncul di kumparan primer, maka terjadilah induksi sendiri (*self-induction*) yang juga terjadi pada kumparan sekunder akibat pengaruh induksi dari kumparan primer. Hal ini disebut induksi bersama (*mutual-induction*). Akibat *mutual-induction*, pada kumparan sekunder juga akan menimbulkan fluks magnet, maka dari itu arus sekunder dapat mengalir dan terjadi gaya gerak listrik.

2.2.3 Konstruksi Transformator

Secara garis besar, transformator memiliki dua tipe konstruksi yang umum digunakan, yaitu tipe inti (*core-form*) dan tipe cangkang (*shell-form*). Tipe inti memiliki jenis transformator dengan kumparan primer dan kumparan sekunder berada pada sisi lengan yang berbeda. Sedangkan tipe cangkang menggambarkan bahwa kumparan primer dan kumparan sekunder dipasang secara menumpuk. Menumpuk disini dapat diartikan dipasang secara atas-bawah atau luar-dalam. Ilustrasi konstruksi transformator satu fasa dan tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Transformator satu fasa dengan tipe inti (a); Transformator tiga fasa dengan tipe inti (b).



Gambar 2.3 Transformator satu fasa dengan tipe cangkang (a); Transformator tiga fasa dengan tipe cangkang (b).

2.2.4 Transformator Ideal

Transformator dapat dikatakan ideal apabila tidak terdapat rugi-rugi dan kebocoran fluks. Sehingga dapat dikatakan tidak ada energi yang diubah ke dalam bentuk energi lain yang menyebabkan daya listrik pada kumparan sekunder memiliki nilai yang sama terhadap daya listrik pada kumparan primer. Dengan sifat seperti itu, maka transformator ideal dianggap memiliki tingkat efisiensi 100 persen akibat tidak adanya rugi-rugi, seperti mengabaikan parameter resistansi lilitan, fluks bocor tidak diperhitungkan, dan tidak adanya rugi-rugi inti serta permeabilitas inti yang sangat tinggi. Di dunia nyata, transformator hanya mampu mendekati kondisi ideal atau bisa dikatakan tidak pernah tercapai dalam aplikasi praktis transformator.

Pada transformator ideal, besar tegangan yang terhubung melalui kumparan primer adalah sama dengan gaya gerak listrik yang berubah terhadap waktu. Gaya gerak listrik tersebut dapat mempengaruhi besarnya nilai fluks yang dihasilkan yang juga berubah terhadap waktu. Gaya gerak listrik tersebut dapat ditulis secara matematis menggunakan persamaan berikut:

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

dengan e	= Gaya gerak listrik (Volt)
N	= Jumlah belitan
$\frac{d\phi}{dt}$	= Perubahan fluks magnet terhadap waktu

Kumparan primer menghasilkan fluks yang mengalir melalui inti akan menginduksi kumparan sekunder yang akan menghasilkan gaya gerak listrik yang terinduksi pada kumparan sekunder. Gaya gerak listrik pada kumparan sekunder dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

Apabila diasumsikan fluks yang dihasilkan pada kumparan primer sama dengan fluks yang dihasilkan pada kumparan sekunder, gaya gerak listrik sama dengan tegangan terminal (v), dan polaritas diabaikan, maka:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.6)$$

Kesimpulan yang dapat diambil dari Persamaan (2.6) adalah:

- a. Apabila nilai $N_1 > N_2$, akan menjadikan transformator tersebut bersifat *step-down transformer*
- b. Apabila nilai $N_2 > N_1$, akan menjadikan transformator tersebut bersifat *step-up transformer*

2.2.5 Transformator Tidak Ideal

Lain halnya dengan transformator ideal, secara praktis transformator di dunia nyata memiliki parameter-parameter yang tidak dapat diabaikan meskipun kecil nilainya. Seperti contohnya adalah belitan transformator yang memiliki nilai resistansi belitan walaupun besar nilainya bisa dikategorikan kecil. Resistansi belitan dapat mengakibatkan terjadinya fluks bocor. Fluks bocor adalah fluks yang keluar melalui udara di sekitar belitan. Fluks bocor yang dihasilkan oleh kumparan primer dan kumparan sekunder dapat menyebabkan terjadinya fluks bersama (*mutual-flux*). Fluks tersebut tidak mengalir pada udara, melainkan mengalir pada inti transformator.

Selain itu, di dunia nyata, transformator tidak dapat mengkonversikan daya secara sempurna layaknya transformator ideal. Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan kondisi tersebut, antara lain pengaruh resistansi belitan, fluks bocor, dan arus eksitasi akibat keterbatasan permeabilitas inti. Faktor lainnya adalah adanya rugi-rugi daya, seperti rugi-rugi inti yang dipengaruhi oleh resistansi inti dan reaktansi magnetik yang terjadi pada inti transformator. Permeabilitas rangkaian magnetik yang terbatas dapat mempengaruhi besar nilai arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya gerak magnet untuk mempertahankan fluks yang diperlukan transformator supaya tetap bekerja. Gaya gerak magnet dan arus yang diperlukan berbanding lurus dengan kerapatan fluks atau kerapatan medan magnet (B) yang diperoleh dari rumus sebagai berikut:

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2.7)$$

dengan B = Kerapatan medan magnet (Wb/m^2)
 ϕ = Fluks magnet (Wb)
 A = Luas permukaan inti feromagnetik (m^2)

Kerapatan medan magnet menggambarkan besar kuat medan yang dipengaruhi oleh intensitas medan magnet dan permeabilitas material magnet yang dapat ditulis dalam persamaan sebagai berikut:

$$B = \mu H \quad (2.8)$$

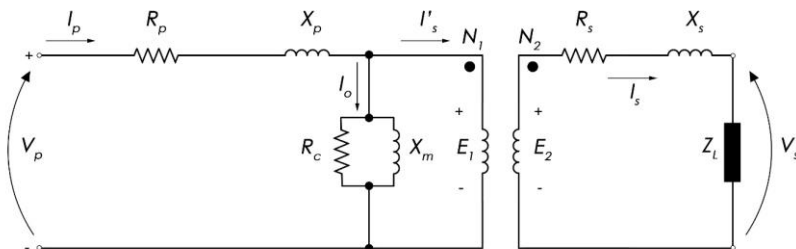
dengan μ = Konstanta permeabilitas material (H/m)
 H = Intensitas medan magnet (A/m)

2.2.6 Rangkaian Ekvivalen Transformator

Pada kondisi nyata atau pada kondisi tidak ideal, pemodelan rangkaian yang mendekati dengan transformator tersebut perlu memperhatikan beragam parameter yang akan jauh membuat pemodelan rangkaian ekvivalen tersebut menjadi lebih kompleks. Rangkaian ekvivalen ini digunakan untuk menganalisis kerja transformator sesuai dengan kondisi nyata dengan mempertimbangkan rugi-rugi belitan dan komponen material inti, seperti reaktansi magnetisasi dan resistansi inti. Selain itu pada rangkaian ekvivalen terdapat banyak parameter penting lain yang ditunjukkan oleh Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Parameter pada rangkaian ekvivalen transformator

Parameter	Simbol
Tegangan Primer	V_p
Gaya Gerak Listrik Primer	E_1
Hambatan Primer	R_p
Arus Primer	I_p
Reaktansi Primer	X_p
Jumlah Lilitan Primer	N_1
Impedansi Beban	Z_L
Tegangan Sekunder	V_s
Gaya Gerak Listrik Sekunder	E_2
Hambatan Sekunder	R_s
Arus Sekunder	I_s
Reaktansi Sekunder	X_s
Jumlah Lilitan Sekunder	N_2
Konstanta Perbandingan	α
Reaktansi Magnetik	X_m
Hambatan Inti	R_c



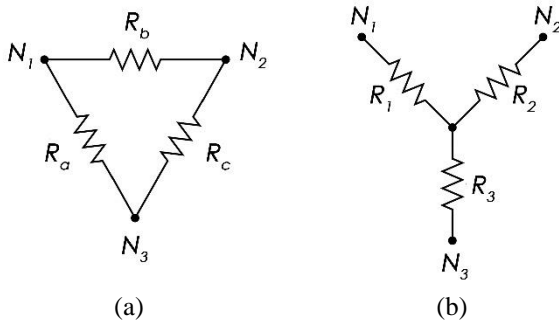
Gambar 2.4 Rangkaian ekivalen transformator

Sedangkan pemodelan rangkaian ekivalen transformator ditunjukkan melalui gambar diatas beserta parameter-parameter yang telah disebutkxan.

2.2.7 Transformator Tiga Fasa

Pada dasarnya transformator tiga fasa dapat disusun dari kombinasi tiga unit transformator satu fasa atau langsung terdiri dari satu unit konstruksi transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa sendiri dibuat untuk dapat memenuhi kebutuhan sistem kelistrikan tiga fasa, baik masyarakat maupun industri. Konstruksi sederhana transformator tiga fasa secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.2(b) dan 2.3(b).

Transformator tiga fasa juga memiliki jenis konstruksi tipe inti dan tipe cangkang yang telah disajikan pada Gambar 2.2 dan 2.3. Untuk menghubungkan belitan pada transformator tiga fasa, terdapat tiga jenis hubungan, yaitu hubungan wye atau bintang (Y), hubungan delta (Δ), dan hubungan zig-zag. Namun, pada umumnya untuk menghubungkan kumparan primer dengan kumparan sekunder dapat dilakukan melalui empat pilihan kombinasi hubungan, yaitu hubungan Y- Δ ; hubungan Δ -Y; hubungan Δ - Δ ; dan hubungan Y-Y. Pada transformator ini, tiap belitan fasanya memiliki perbedaan sudut fasa sebesar 120° . Sedangkan untuk tipe hubungan wye (Y) dan delta (Δ) terdapat perbedaan fasa sebesar 30° . Hubungan wye (Y) dan delta (Δ) dapat dilihat pada Gambar 2.5.

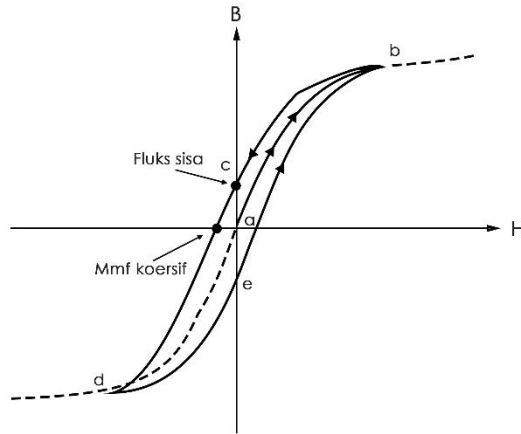


Gambar 2.5 Belitan hubungan delta (Δ) (a); Belitan hubungan wye (Y) (b).

2.2.8 Kurva Magnetisasi Transformator

Kurva magnetisasi atau bisa disebut kurva histerisis atau juga dikenal sebagai kurva B-H adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara kerapatan medan magnet (B) dan intensitas medan magnet (H). Kurva ini menunjukkan pengaruh kerapatan medan magnet yang terjadi pada inti transformator akibat kenaikan intensitas medan magnet. Kurva magnetisasi transformator juga menunjukkan bahwa terdapat ketidaklinieran pada inti transformator.

Dari Gambar 2.6, jalur a ke b merupakan kondisi awal transformator pada saat diberikan arus. Selanjutnya kerapatan fluks meningkat sampai mencapai titik jenuh atau saturasi transformator. Ketika nilai arus menurun, nilai fluks juga akan menurun melalui jalur b-c-d yang disebabkan oleh adanya faktor fluks sisa. Untuk bisa membuat nilai fluks menjadi nol, maka sejumlah *magnetomotive force* atau gaya gerak magnet dibutuhkan yang dikenal sebagai *coercive magnetomotive force*. Semakin besar arus yang mengalir di dalam suatu kumparan akan semakin besar pula kuat medannya. Begitu juga dengan meningkatnya jumlah belitan kawatnya, maka garis gaya magnet akan semakin banyak dihasilkan. Perkalian antara kuat arus dan jumlah belitan disebut *ampere-turns*, dikenal dengan istilah gaya gerak magnet.



Gambar 2.6 Kurva magnetisasi transformator

Ketika nilai arus bertambah, nilai fluks juga akan bertambah melalui jalur d-e-b yang juga disebabkan oleh adanya faktor fluks sisa. Pada saat intensitas medan sudah mencapai titik nol, kerapatan fluks tidak mencapai titik nol karena terdapat fluks sisa. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas material dari inti transformator. Apabila jenis material inti yang digunakan semakin baik, maka kurva magnetisasi akan memiliki bentuk relatif ramping atau mendekati bentuk linier. Dan apabila ditemukan kurva magnetisasi yang memiliki bentuk lebar, maka jenis material inti transformator yang digunakan kurang baik atau tidak sesuai dengan kebutuhan.

2.3 Rugi-rugi pada Transformator

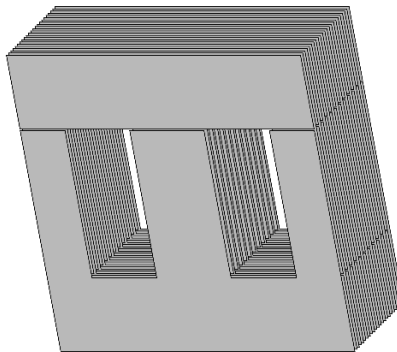
2.3.1 Rugi Arus Eddy (*Eddy Current*)

Arus Eddy atau arus pusar merupakan arus yang terdapat pada inti transformator yang disebabkan oleh tegangan yang telah terinduksi oleh fluks. Arus Eddy mengalir pada inti transformator yang memiliki nilai resistansi yang dapat menghasilkan panas. Apabila arus Eddy mengalir secara kontinyu, panas yang ditimbulkan pada inti transformator dapat mengakibatkan terjadinya kerusakan material inti. Besar rugi-rugi arus Eddy dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

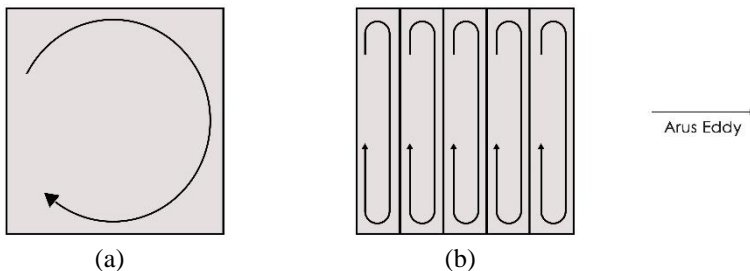
$$P_e = k_e f^2 t^2 B_{max}^2 \quad (2.9)$$

dengan P_e = Rugi-rugi arus Eddy (W/kg)
 k_e = Konstanta material inti transformator
 f = Frekuensi (Hz)
 t = Ketebalan material inti (m)
 B = Nilai puncak kerapatan medan magnet (T)

Untuk mengurangi rugi-rugi arus Eddy, maka inti material transformator dibuat berlapis-lapis atau dilaminasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.7 dengan tujuan supaya dapat memecah induksi arus Eddy yang terbentuk di dalam inti material atau bahan transformator. Ilustrasi perbedaan arus Eddy di dalam inti material tunggal dengan inti material berlaminasi dapat dilihat melalui Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Inti transformator yang dibuat berlaminasi



Gambar 2.8 Arus Eddy pada inti material utuh (a); Arus Eddy yang telah dipecah pada inti material berlaminasi (b)

2.3.2 Rugi Tembaga

Konduktor yang digunakan sebagai belitan memiliki nilai resistansi yang akan menimbulkan adanya rugi-rugi tembaga. Rugi-rugi tembaga terjadi di kumparan, baik primer maupun sekunder. Kumparan primer dan sekunder umumnya dibuat dari gulungan kawat tembaga yang dilapisi oleh isolator tipis yang disebut enamel. Gulungan kawat yang memiliki ukuran panjang inilah yang akan meningkatkan nilai hambatan dalam kumparan. Nilai rugi-rugi tembaga dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$P_{cu} = I_{cu}^2 R_{cu} \quad (2.10)$$

dengan P_{cu} = Rugi-rugi tembaga (Watt)
 I_{cu} = Arus pada kumparan (Ampere)
 R_{cu} = Nilai resistansi kumparan (Ohm)

2.3.3 Rugi Histerisis

Rugi-rugi histerisis disebabkan oleh adanya gesekan molekul yang melawan aliran gaya magnet di dalam inti besi. Gesekan molekul ini akan menyebabkan panas. Panas yang ditimbulkan oleh gesekan ini menunjukkan kerugian daya. Selain itu, panas yang tinggi juga dapat merusak transformator, sehingga pada transformator daya secara umum dengan kapasitas daya yang besar memiliki media pendingin.

Histerisis adalah fluks magnet yang tertinggal karena kenaikan atau turunnya nilai magnetisasi. Kurva histerisis dapat menunjukkan karakteristik material magnetik suatu inti transformator. Besarnya rugi-

rugi histerisis pada transformator dapat dihitung melalui persamaan matematis berikut ini:

$$P_h = k_h f^2 B_{max}^n \quad (2.11)$$

dengan P_h = Rugi-rugi histerisis (W/kg)
 k_h = Konstanta material inti transformator
 f = Frekuensi (Hz)
 B = Nilai puncak kerapatan medan magnet (T)
 n = Nilai eksponensial dari material dan tergantung B_{max}

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

SKEMA PEMODELAN TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS MENGGUNAKAN *FINITE-ELEMENT METHOD*

Bab ini menjelaskan metodologi penelitian yang digunakan pada penelitian yang terdiri dari simulasi transformator tiga fasa asimetris menggunakan perangkat lunak dan pengukuran-pengukuran parameter yang akan digunakan dalam pemodelan transformator. Simulasi transformator menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga atau *finite-element method*.

3.1 Spesifikasi Transformator Tiga Fasa Asimetris

Penelitian ini akan memodelkan transformator tiga fasa asimetris sebagai obyek penelitian dengan topologi kaki transformator yang berbeda. Yang dimaksud topologi kaki transformator yang berbeda adalah adanya perbedaan panjang pada kaki tengah transformator dibandingkan kaki transformator bagian kiri dan kanan. Transformator tipe tersebut dalam dunia penelitian sering disebut sebagai transformator tiga fasa asimetris.

Transformator yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi yang tertera pada Tabel 3.1. Dan cara pemotongan inti pada transformator tiga fasa asimetris ini adalah E-I.

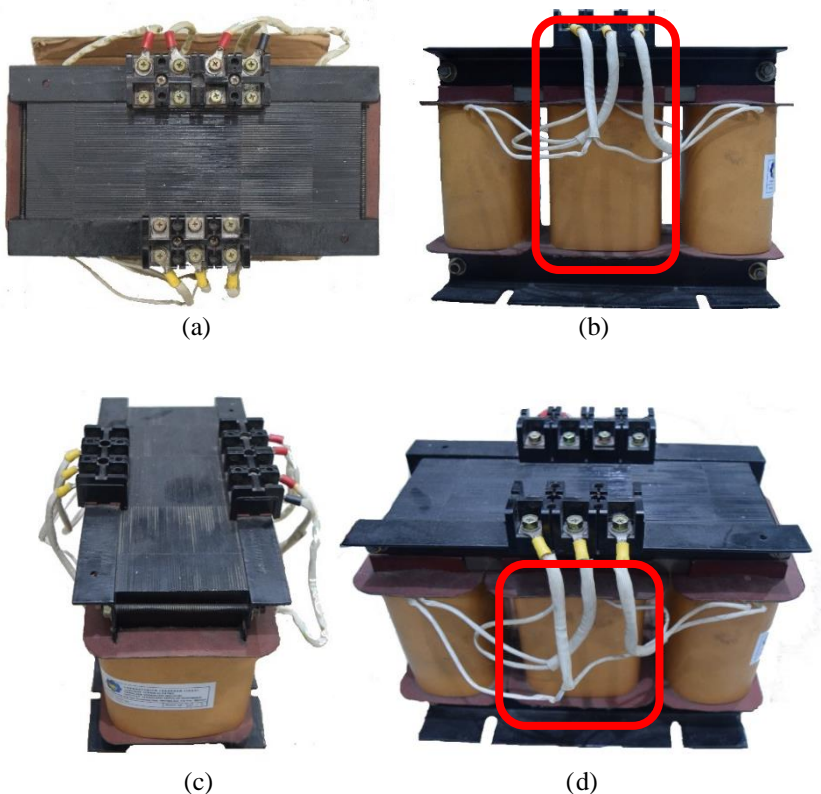
Tabel 3.1 Spesifikasi transformator tiga fasa asimetris

Spesifikasi Transformator	
Fasa	3 Fasa
Tipe Konstruksi	<i>Core-form</i>
Kapasitas Daya	5-kVA
Tegangan Primer	380 Volt
Tegangan Sekunder	380 Volt
Hubungan Lilitan	$Y - \Delta$
Jumlah Lilitan Primer	255
Jumlah Lilitan Sekunder	255
Resistansi Belitan Kaki Kanan	1,48 Ω / fasa
Resistansi Belitan Kaki Tengah	0,89 Ω / fasa
Resistansi Belitan Kaki Kiri	1,48 Ω / fasa
Frekuensi	50 Hz

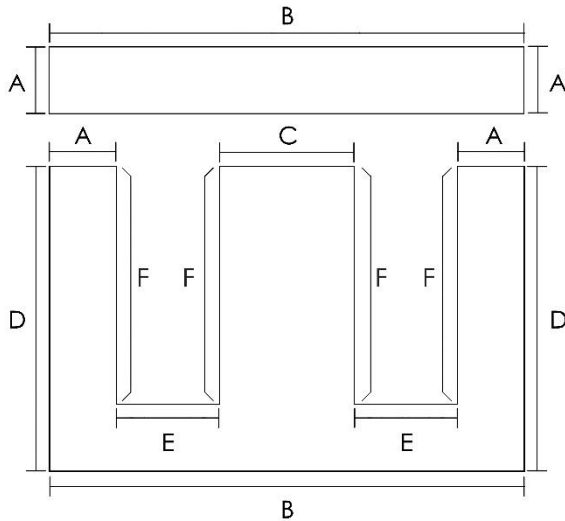
3.2 Dimensi Inti Transformator Tiga Fasa Asimetris

Transformator tiga fasa asimetris yang digunakan pada penelitian ini memiliki parameter yang terdiri dari spesifikasi dimensi, bentuk potongan inti, dan tebal laminasi. Spesifikasi dimensi dan bentuk potongan inti diperoleh melalui pengukuran fisis obyek transformator.

Bentuk transformator yang digunakan ditunjukkan melalui Gambar 3.1. Spesifikasi dimensi dan bentuk potongan inti hasil pengukuran fisis diuraikan melalui Gambar 3.2 serta Tabel 3.2.



Gambar 3.1 Transformator tiga fasa asimetris tampak atas (a); Transformator tiga fasa asimetris tampak depan (b); Transformator tiga fasa asimetris tampak samping (c); Transformator tiga fasa asimetris tampak keseluruhan



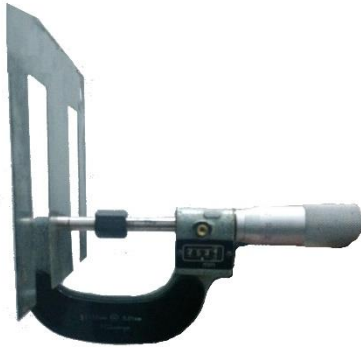
Gambar 3.2 Bentuk inti transformator tiga fasa asimetris

Terlihat bahwa kaki tengah transformator memiliki dimensi panjang dua kali lebih besar daripada kedua kaki di sisi samping. Transformator ini menggunakan cara potong E-I. Spesifikasi dimensi panjang pada transformator ini akan dijelaskan melalui Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Spesifikasi dimensi transformator tiga fasa asimetris

Dimensi Transformator	Ukuran
A	4 cm
B	28 cm
C	8 cm
D	18 cm
E	6 cm
F	14 cm
Tinggi total	22 cm
Ketebalan	10 cm
Ketebalan Laminasi	0,03 cm

Sedangkan pengambilan data ukuran inti yang telah dilaminasi dilakukan dengan cara pengambilan sampel inti menggunakan jangka sorong seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.

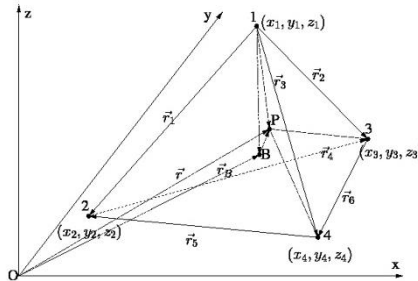


Gambar 3.3 Pengukuran ketebalan inti laminasi menggunakan jangka sorong

3.3 Pemodelan Menggunakan *Finite-Element Method* (FEM)

Metode simulasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *finite-element method* atau metode elemen hingga. Metode ini merupakan salah satu metode numerik yang sering digunakan untuk menganalisis dan menyelesaikan permasalahan termal, elektromagnetik, komponen frekuensi tinggi, mekanikal, dan konstruksi struktur. Prinsip dasar dari metode ini adalah proses diskretisasi. Untuk memodelkan suatu bentuk dimensi, baik dua maupun tiga dimensi dalam proses diskretisasi, suatu benda atau area yang dianalisis dibagi ke dalam bentuk *mesh* atau kumpulan-kumpulan elemen yang saling terhubung. Melalui metode ini, permasalahan kompleks semacam variasi ketebalan, bentuk, dan kondisi tertentu dapat diselesaikan dengan pendekatan.

Diskretisasi merupakan proses pembentukan area atau *body* dengan memisahnya ke dalam sebuah sistem yang ekuivalen dari suatu bagian terkecil atau elemen yang saling berhubungan antar kumpulan titik-titik (*node*). Proses diskretisasi pada FEM ini adalah proses pembagian struktur obyek dengan membaginya ke dalam bentuk *mesh-mesh* kecil tergantung pengaturan obyek tersebut. Setiap *mesh* akan dihitung sesuai kebutuhan dan pada akhirnya akan digabungkan menjadi satu bentuk yang lebih besar.



Gambar 3.4 Bentuk elemen tetrahedral penyusun *mesh*

Pada perambatan gelombang elektromagnetik yang melewati suatu media merupakan salah satu fenomena fisis yang memiliki bentuk persamaan diferensial, sehingga FEM dipilih untuk memodelkan dan menyelesaikan fenomena tersebut. Pemodelan tiga dimensi transformator yang memiliki panjang, lebar, tinggi akan menghasilkan volume dan selanjutnya dibagi ke dalam volume elemen atau *mesh* yang lebih kecil dalam jumlah yang banyak sesuai spesifikasi obyek. Terdapat beberapa bentuk *mesh* yang sering dijumpai dan digunakan dalam FEM ini seperti planar dan tetrahedral. Dalam penelitian ini, digunakan bentuk *mesh* tetrahedral yang merupakan sebuah bentuk tiga dimensi yang terdiri dari empat buah *vertex*. Tiap-tiap volume dari obyek yang akan diamati akan menghasilkan bentuk tetrahedral yang bervariasi.

3.3.1 Penggambaran Konstruksi Transformator Tiga Fasa Asimetris

Pemodelan transformator tiga fasa asimetris menggunakan bantuan perangkat lunak *Computer Simulation Technology (CST) Studio*. Langkah awal pemodelan adalah menggambar desain konstruksi tiga dimensi transformator. Penggambaran konstruksi transformator bentuk potongan inti E-I dimulai dengan memasukkan koordinat tiap titik sudut transformator yang telah disesuaikan dengan skala nyata obyek transformator. Material inti yang digunakan adalah baja ST-37 dengan variasi parameter ketebalan laminasi. Berikut ini merupakan spesifikasi baja ST-37, koordinat bentuk material, dan gambar pemodelan transformator berbasis FEM yang diuraikan Tabel 3.3 dan Tabel 3.4.

Tabel 3.3 Komposisi baja ST-37 [14]

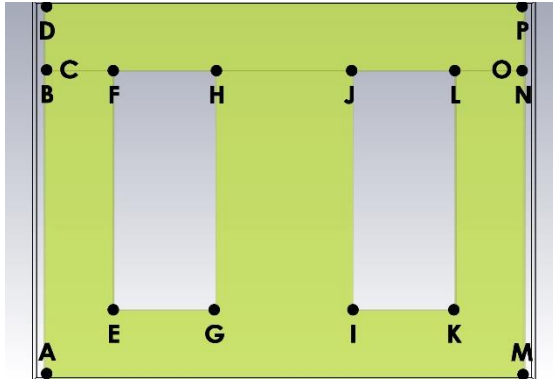
Elemen	Kadar (%)
Besi, Fe	99,19
Manganat, Mn	0,90
Karbon, C	0,20
Sulfur, S	0,05
Fosfor, P	0,04
Silikon, Si	0,06

Selain itu, baja ST-37 memiliki kekuatan tarik sebesar 37 kg/mm². Kekuatan tarik adalah harga maksimal kemampuan material sebelum material tersebut mengalami kerusakan berupa patah. Perubahan sifat material baja pada kondisi tertentu dapat membahayakan fungsi konstruksi transformator.

Untuk membuat pemodelan transformator dalam bentuk tiga dimensi, harus dilakukan pemetaan koordinat bentuk inti transformator secara presisi yang sebelumnya telah dilakukan pengukuran secara fisis. Berikut adalah koordinat yang digunakan untuk menggambar bentuk inti transformator dengan cara potong E-I yang ditampilkan dalam Gambar 3.5, Gambar 3.6, dan Gambar 3.7.

Tabel 3.4 Koordinat bentuk material potongan E-I

Titik Koordinat	Sumbu X	Sumbu Y
A	0	0
B	0	18
C	0	18
D	0	22
E	4	4
F	4	18
G	10	4
H	10	18
I	18	4
J	18	18
K	24	4
L	24	18
M	28	0
N	28	18
O	28	18
P	28	22



Gambar 3.5 Letak koordinat bentuk transformator

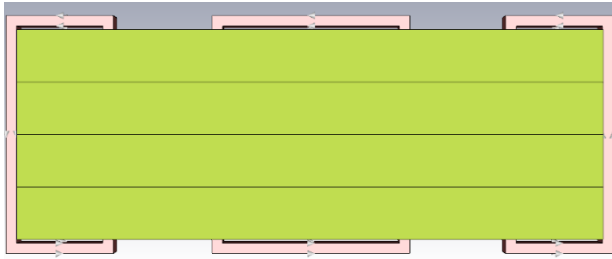


(a)

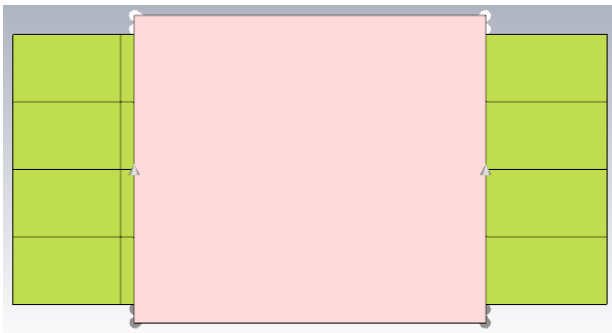


(b)

Gambar 3.6 Transformator tanpa laminasi tampak atas (a); Transformator tanpa laminasi tampak samping (b)



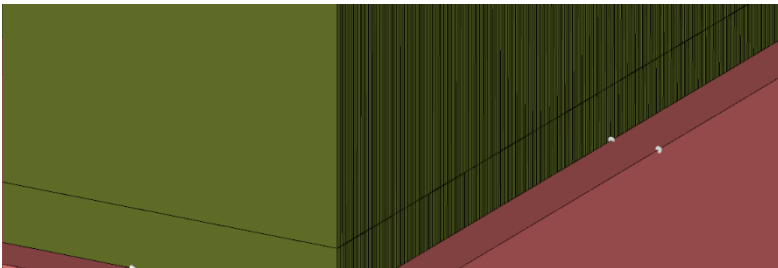
(a)



(b)

Gambar 3.7 Transformator dengan tebal laminasi 2,5 cm tampak atas (a); Transformator dengan tebal laminasi 2,5 cm tampak samping (b)

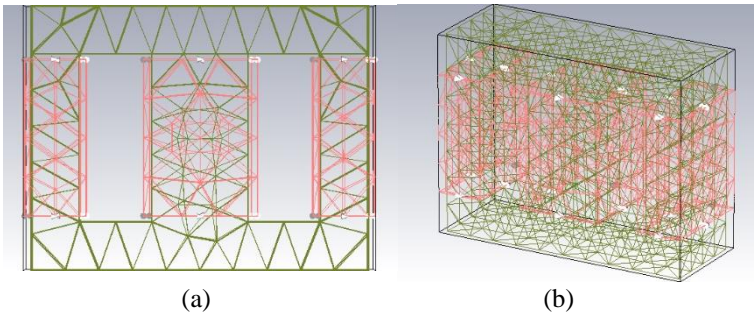
Khusus transformator dengan ketebalan laminasi 0,03 cm ditampilkan dalam bentuk *zoom-in* di Gambar 3.8, karena kerapatan laminasi yang lebih tinggi dibandingkan dua transformator sebelumnya. Apabila transformator dengan ketebalan laminasi 0,03 cm ditunjukkan dalam bentuk *zoom-out* maka potongan laminasi tersebut tidak terlihat.



Gambar 3.8 Transformator dengan tebal laminasi 0,03 cm tampak perspektif

3.3.2 Pengisian Parameter dan Proses Diskretisasi pada Pemodelan Transformator Tiga Fasa Asimetris

Sebelum simulasi dijalankan, perangkat lunak CST Studio akan memisahkan struktur transformator yang telah terbentuk ke dalam elemen-elemen yang saling terhubung antar titik yang dinamakan *mesh*. Dalam FEM, proses ini dinamakan diskretisasi. *Mesh* penyusun yang digunakan dalam penelitian ini adalah tetrahedral seperti yang ditampilkan dalam Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Konstruksi tetrahedral *mesh* tampak depan (a); Konstruksi tetrahedral *mesh* tampak perspektif (b)

3.3.3 Pemilihan Lokasi Monitor Kerapatan Medan Magnet dan Intensitas Medan Magnet

Karena fluks mengalir secara kontinu, maka pengamatan besar nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet dilakukan pada titik-titik strategis. Pemilihan titik-titik monitor dilakukan untuk mengamati kurva histerisis. Titik monitor pada obyek penelitian ini disajikan dalam tabel 3.5

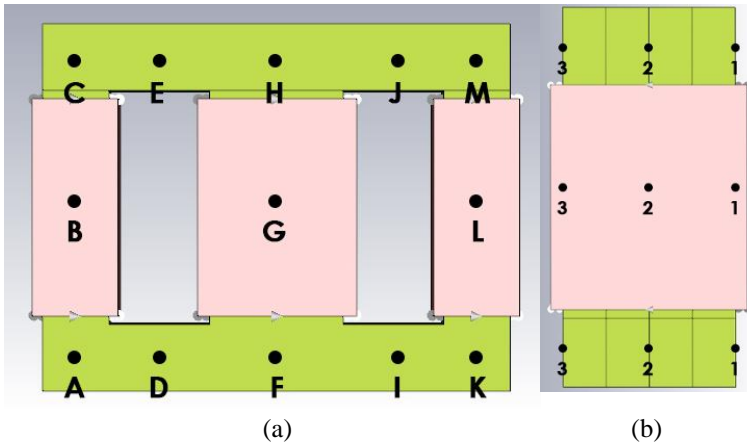
Tabel 3.5 Daftar titik monitor kurva B-H

Titik Monitor	Koordinat Sumbu X	Koordinat Sumbu Y	Koordinat Sumbu Z
A ₁	2	2	0
A ₂	2	2	5
A ₃	2	2	10
B ₁	2	11	0
B ₂	2	11	5
B ₃	2	11	10

Tabel 3.5 Daftar titik monitor kurva B-H (lanjutan)

Titik Monitor	Koordinat Sumbu X	Koordinat Sumbu Y	Koordinat Sumbu Z
C ₁	2	20	0
C ₂	2	20	5
C ₃	2	20	10
D ₁	7	2	0
D ₂	7	2	5
D ₃	7	2	10
E ₁	7	20	0
E ₂	7	20	5
E ₃	7	20	10
F ₁	14	2	0
F ₂	14	2	5
F ₃	14	2	10
G ₁	14	11	0
G ₂	14	11	5
G ₃	14	11	10
H ₁	14	20	0
H ₂	14	20	5
H ₃	14	20	10
I ₁	21	2	0
I ₂	21	2	5
I ₃	21	2	10
J ₁	21	20	0
J ₂	21	20	5
J ₃	21	20	10
K ₁	26	2	0
K ₂	26	2	5
K ₃	26	2	10
L ₁	26	11	0
L ₂	26	11	5
L ₃	26	11	10
M ₁	26	20	0
M ₂	26	20	5
M ₃	26	20	10

Keterangan: Huruf pada titik monitor menandakan lokasi titik ditinjau dari penampang, sedangkan angka menandakan lokasi titik ditinjau dari ketebalan.

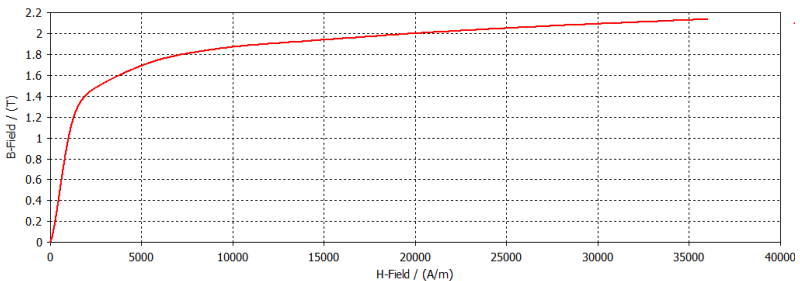


Gambar 3.10 Titik-titik monitor pengamatan transformator kategori huruf (a); Titik-titik monitor pengamatan transformator kategori angka (b)

3.3.4 Kurva Magnetisasi Material Baja ST-37

Material baja ST-37 merupakan baja dengan kekuatan tarik (*tensile-strength*) sebesar 37 MPa (Mega Pascal) atau setara dengan 37 kg/mm². Gambar 3.11 adalah hasil simulasi yang menampilkan kurva magnetisasi pada baja ST-37.

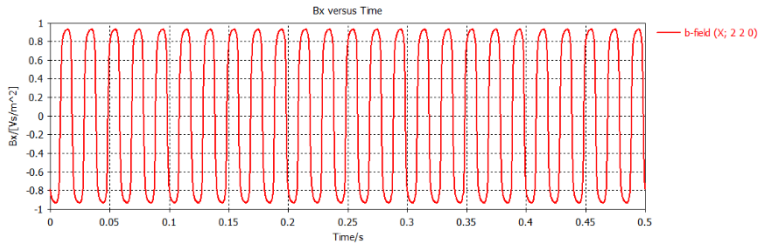
Semakin besar intensitas medan magnet, maka akan semakin besar pula nilai kerapatan medan magnetnya sebelum menemukan titik kejenuhan atau saturasi. Pada grafik tersebut terlihat bahwa untuk material ST-37 memiliki titik saturasi pada saat intensitas medan magnetnya bernilai 7.235,44 A/m dan kerapatan medan magnetnya bernilai 1,79786 T.



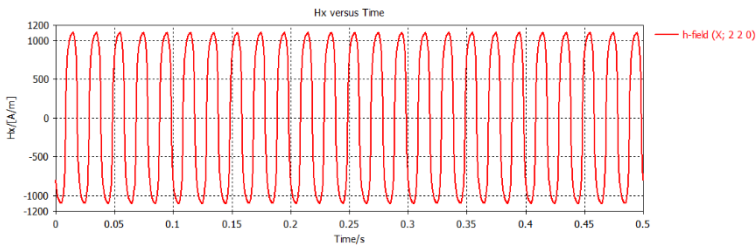
Gambar 3.11 Kurva magnetisasi material baja ST-37

3.3.5 Akuisisi Data Kerapatan Medan Magnet dan Intensitas Medan Magnet terhadap Waktu pada Titik Monitor

Setelah program selesai dijalankan, akan dilakukan akuisisi data kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet terhadap waktu pada tiap titik monitor. Kemudian, dilakukan plot kedua data yang telah didapatkan ke dalam satu bentuk kurva histerisis, dimana kerapatan medan magnet menjadi nilai di sumbu y dan intensitas medan magnet menjadi nilai pada sumbu x yang didapatkan seperti Gambar 3.12 dan 3.13

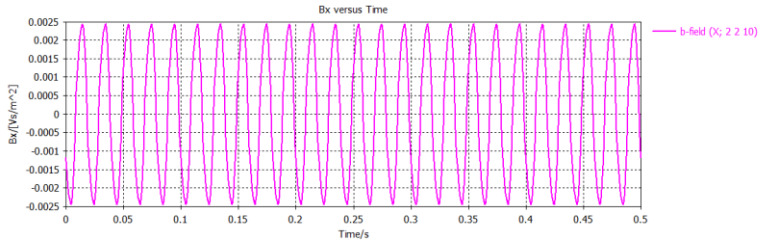


(a)

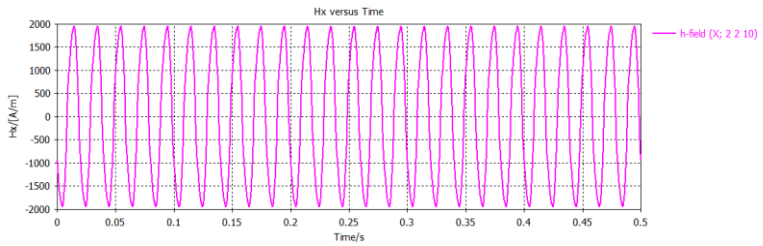


(b)

Gambar 3.12 Contoh pengambilan data kerapatan medan magnet di titik A_1 (a); Contoh pengambilan data intensitas medan magnet di titik A_1 (b)



(a)



(b)

Gambar 3.13 Contoh pengambilan data kerapatan medan magnet di titik A₃ (a);
Contoh pengambilan data intensitas medan magnet di titik A₃ (b)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

ANALISIS HASIL SIMULASI KURVA HISTERESIS PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA ASIMETRIS

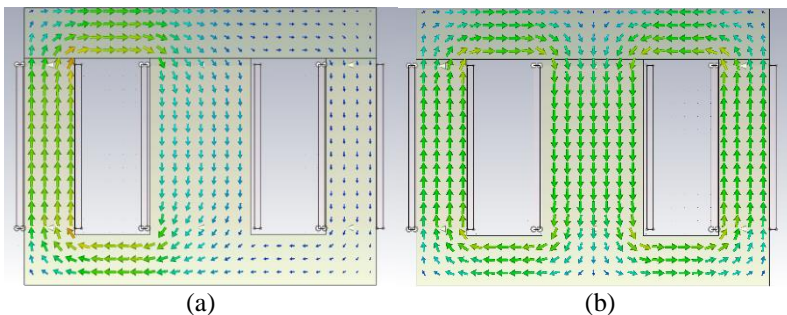
4.1 Distribusi Kerapatan Medan Magnet dan Intensitas Medan Magnet

Nilai kerapatan medan magnet (B) dan intensitas medan magnet (H) didapatkan melalui simulasi FEM pada pemodelan transformator tiga fasa asimetris. Material yang digunakan, baja ST-37 diklasifikasikan ke dalam kategori baja lunak karena terdapat unsur silikon dan memiliki massa jenis (ρ) sebesar 7.850 kg/m^3 . Simulasi ini digunakan untuk mendapatkan kurva perbandingan nilai intensitas medan magnet sebagai sumbu x dengan kerapatan medan magnet sebagai sumbu y.

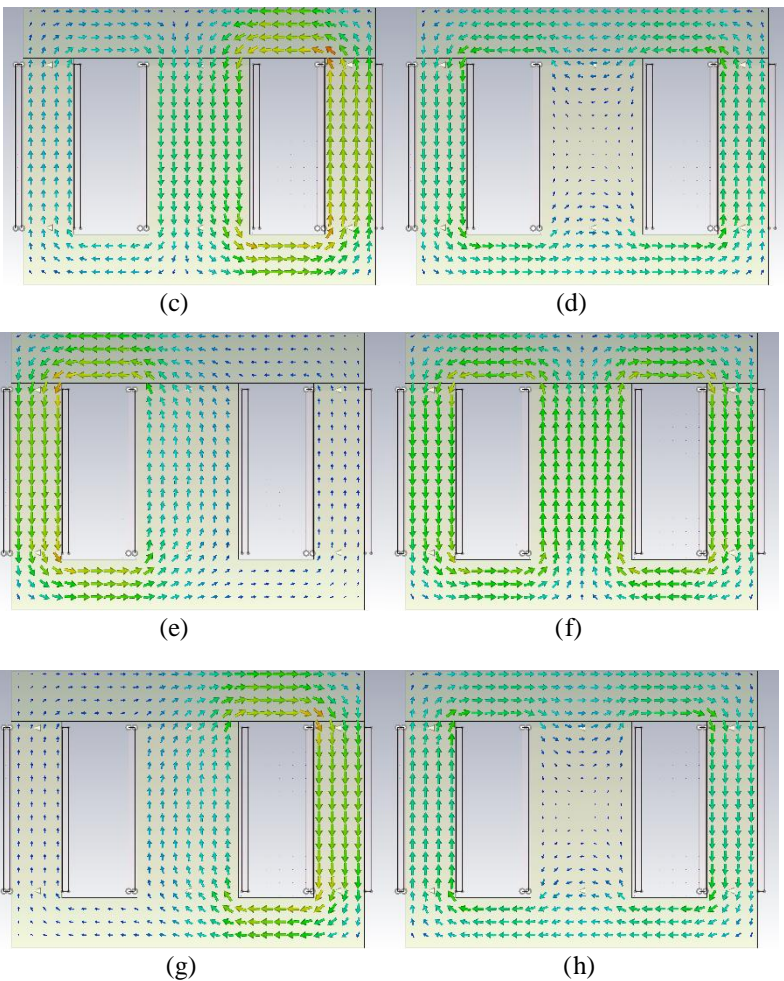
4.1.1 Distribusi Kerapatan Medan Magnet

Pada penelitian ini dilakukan variasi ketebalan inti laminasi, yaitu tanpa laminasi atau bentuk material inti utuh, dengan laminasi ketebalan 2,5 cm, dan laminasi ketebalan 0,03 cm. Berikut adalah hasil simulasi distribusi kerapatan medan magnet dari ketiga variabel tersebut.

4.1.2.1 Distribusi Kerapatan Medan Magnet pada Inti Tanpa Laminasi



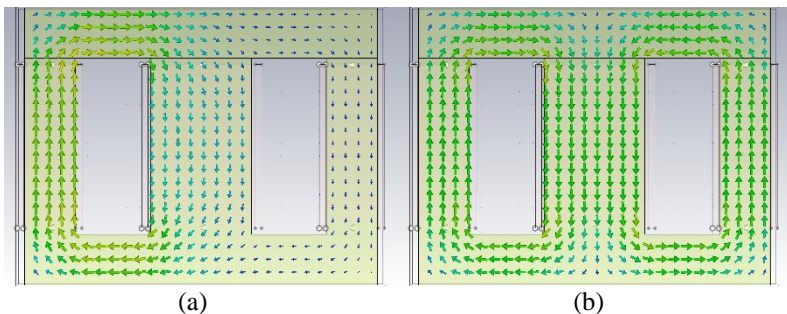
Gambar 4.1 Distribusi kerapatan medan magnet transformator tanpa laminasi pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f); 300° (g); 330° (h)



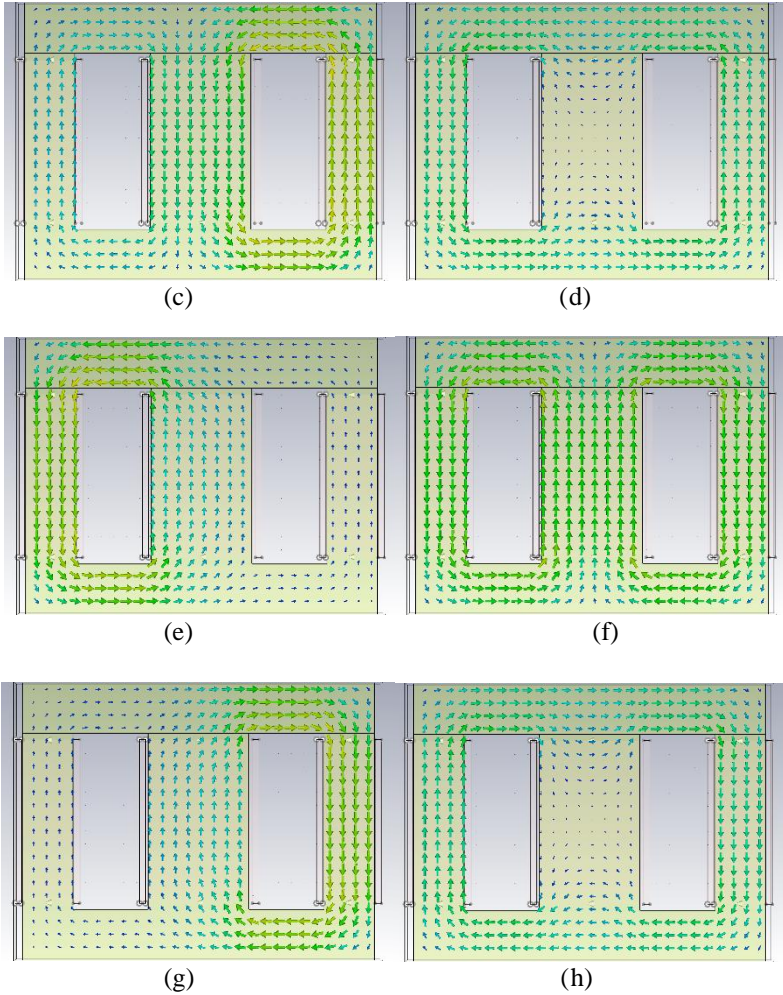
Gambar 4.1 Distribusi kerapatan medan magnet transformator tanpa laminasi pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f); 300° (g); 330° (h) (lanjutan)

Dari hasil simulasi yang dilakukan pada Gambar 4.1, pada sudut fasa 0° distribusi kerapatan medan magnet dengan nilai terbesar bergerak dari kaki bagian kiri menuju ke potongan I, kemudian menuju ke kaki bagian tengah. Pada fasa 60° distribusi kerapatan medan magnet terlihat rata persebarannya dan nilainya sama besar. Kerapatan medan magnet di kaki bagian tengah menyebar sama rata menuju ke kaki bagian kiri dan kanan. Sedangkan pada fasa 90° kerapatan medan magnet dengan nilai terbesar mengalir dari kaki bagian kanan menuju ke kaki bagian tengah melalui potongan I. Fenomena distribusi kerapatan medan magnet pada fasa 150° berbeda dengan sebelumnya, dimana arah persebaran hanya merata pada kaki kanan dan kiri menjauhi kaki bagian tengah melalui kaki kanan menuju kaki kiri pada potongan I. Selanjutnya pada fasa 180° distribusi kerapatan medan magnet memiliki pola yang sama dengan fasa 0° , namun arah distribusinya berlawanan, yaitu menuju bagian bawah. Hal serupa juga terjadi pada fasa 240° , dimana pendistribusiannya merata dan sama besar pada masing-masing kaki seperti fasa 60° . Hanya saja terdapat perbedaan dalam arah alirannya, yaitu menuju potongan I. Fasa 300° memiliki kesamaan pola dengan fasa 90° dan fasa 330° memiliki kesamaan pola dengan fasa 150° . Namun, distribusi kerapatan medan magnet pada fasa 300° mengalir ke arah bawah potongan E. Sedangkan pada fasa 330° , alirannya bergerak dari kaki kiri ke kanan melalui potongan I dan menjauhi kaki bagian tengah. Nilai B maksimal pada inti transformator tanpa laminasi adalah $20,99965 \text{ V.s/m}^2$.

4.1.2.2 *Distribusi Kerapatan Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 2,5 cm*



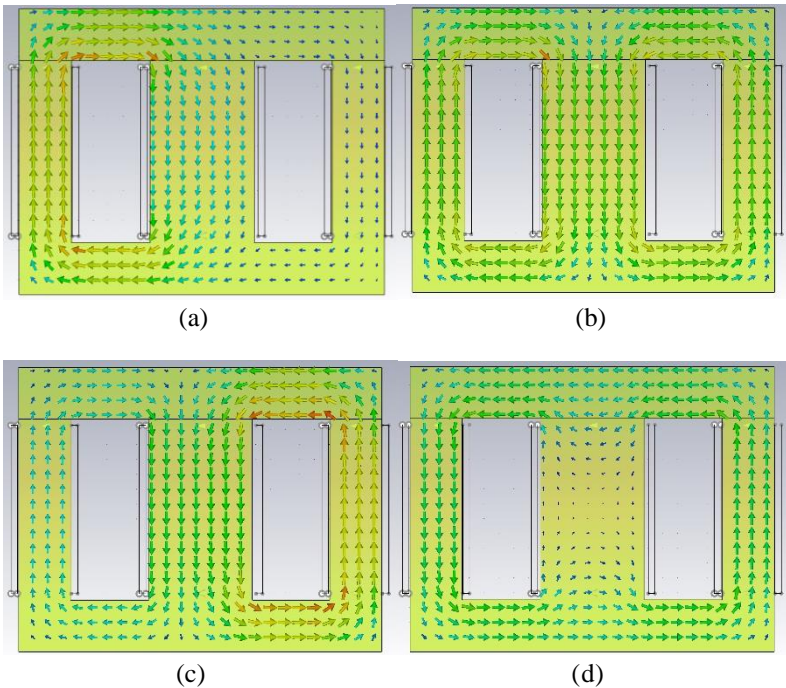
Gambar 4.2 Distribusi kerapatan medan magnet transformator berlaminasi 2,5 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f); 300° (g); 330° (h)



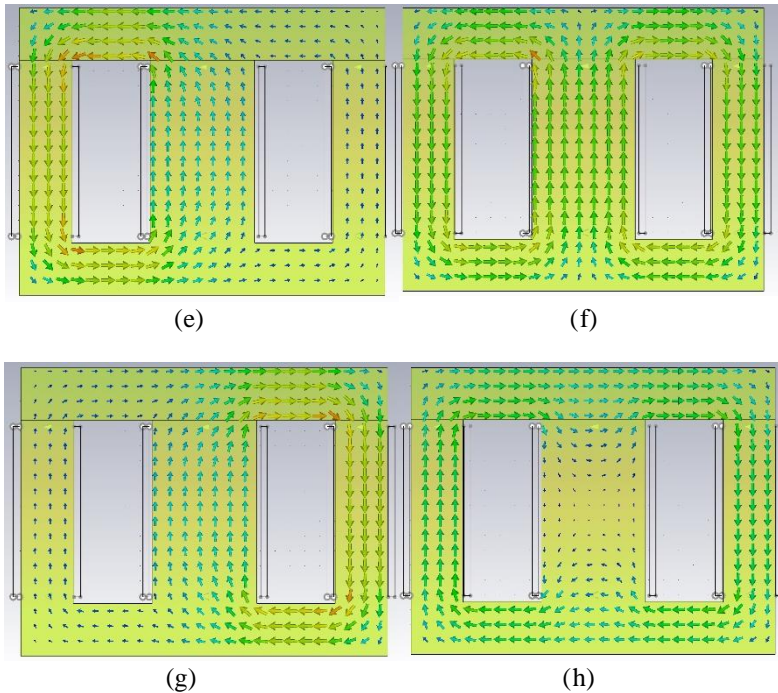
Gambar 4.2 Distribusi kerapatan medan magnet transformator berlaminasi 2,5 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f), 300° (g); 330° (h) (lanjutan)

Hasil simulasi yang ditunjukkan Gambar 4.2, terlihat bahwa distribusi kerapatan medan magnet pada transformator dengan inti tanpa laminasi memiliki kecenderungan distribusi kerapatan medan magnet yang sama apabila dibandingkan dengan transformator dengan inti berlaminasi 2,5 cm. Yang menjadi perbedaan adalah besar nilai kerapatan medan magnetnya. Dari perbandingan skala tersebut, nilai kerapatan medan magnet pada inti transformator tanpa menggunakan laminasi lebih besar daripada nilai kerapatan medan magnet pada inti transformator dengan ketebalan laminasi 2,5 cm. Nilai terbesarnya adalah 20,99965 V.s/m² banding 18,0892 V.s/m².

4.1.2.3 Distribusi Kerapatan Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 0,03 cm

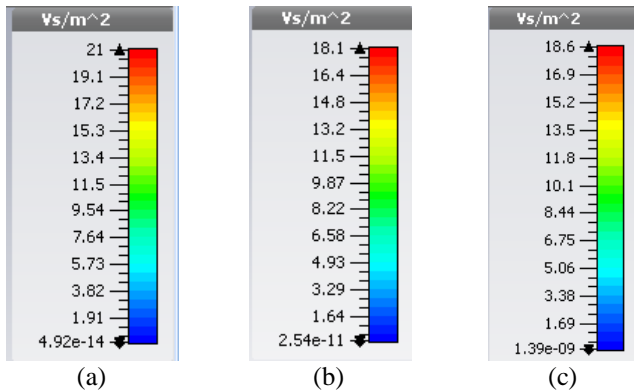


Gambar 4.3 Distribusi kerapatan medan magnet transformator berlaminasi 0,03 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h)



Gambar 4.3 Distribusi kerapatan medan magnet transformator berlaminasi 0,03 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f); 300° (g); 330° (h) (lanjutan)

Dari fasa 0°, 60°, 90°, dan 150° terlihat distribusi kerapatan medan magnetnya memiliki pola yang hampir sama dengan kedua obyek penelitian sebelumnya. Akan tetapi, terdapat kerapatan medan magnet dengan nilai yang lebih besar pada fasa 90°. Pada fasa 90° aliran distribusi kerapatan medan magnetnya memiliki besar yang rata dibandingkan kaki sisi samping transformator. Distribusi kerapatan medan magnet pada fasa 180°, 300°, dan 330° terpusat hanya pada salah satu kaki saja. Pada fasa 240° aliran distribusi kerapatan medan magnetnya merata dan memiliki nilai yang relatif sama serta arah distribusinya berlawanan dengan fasa 60°. Besar nilai maksimal kerapatan medan magnet pada variabel laminasi 0,03 cm adalah 18,5732 V.s/m². Perbandingan skala besar kerapatan medan magnet ketiga pemodelan disajikan pada Gambar 4.4.

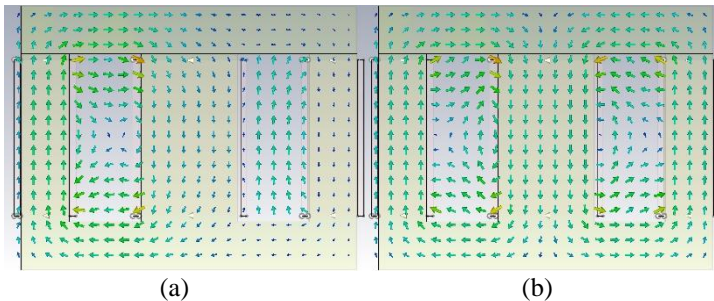


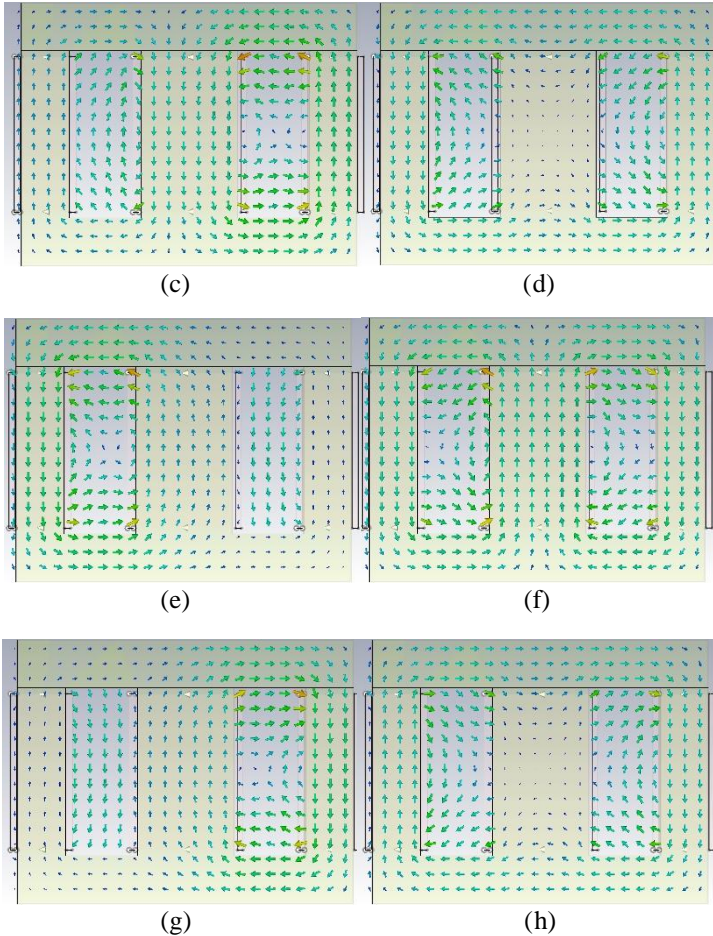
Gambar 4.4 Skala besar kerapatan medan magnet pada transformator tanpa laminasi (a); ketebalan laminasi 2,5 cm (b); ketebalan laminasi 0,03 cm (c)

4.1.2 Distribusi Intensitas Medan Magnet

Pada penelitian ini dilakukan variasi ketebalan inti laminasi, yaitu tanpa laminasi atau bentuk material inti utuh, dengan laminasi ketebalan 2,5 cm, dan laminasi ketebalan 0,03 cm. Berikut adalah hasil simulasi distribusi intensitas medan magnet dari ketiga variabel tersebut.

4.1.3.1 Distribusi Intensitas Medan Magnet pada Inti Tanpa Laminasi



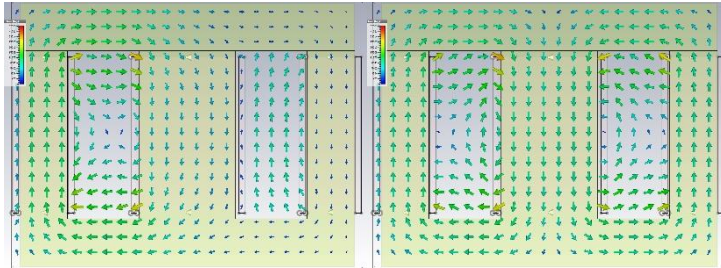


Gambar 4.5 Distribusi intensitas medan magnet transformator tanpa laminasi pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f); 300° (g); 330° (h)

Berdasarkan hasil simulasi, distribusi intensitas medan magnet pada fasa 0° dengan nilai terbesar bergerak dari kaki transformator bagian kiri menuju kaki tengah melalui potongan I. Pada fasa 60° , intensitas medan magnet di masing-masing kaki relatif menyebar rata dengan nilai intensitas medan yang relatif sama. Fasa 60° dan 240° mempunyai pola aliran distribusi yang mirip. Perbedaannya hanya terdapat arah aliran

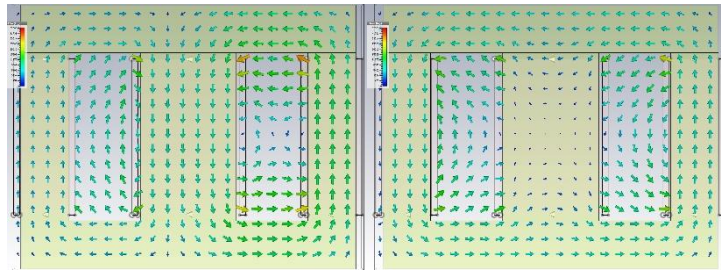
distribusi. Pada fasa 330° dan 150° intensitas medan magnet cenderung lebih besar pada kaki transformator bagian kanan dan kiri, karena menjauhi kaki tengah.

4.1.3.2 *Distribusi Intensitas Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 2,5 cm*



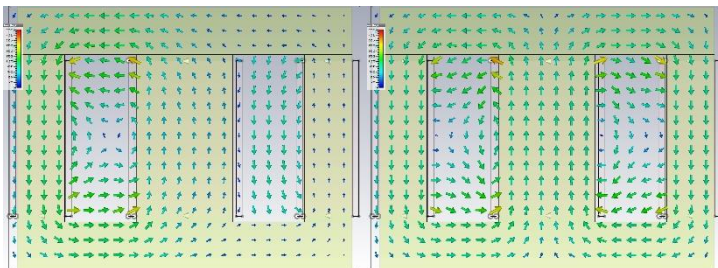
(a)

(b)



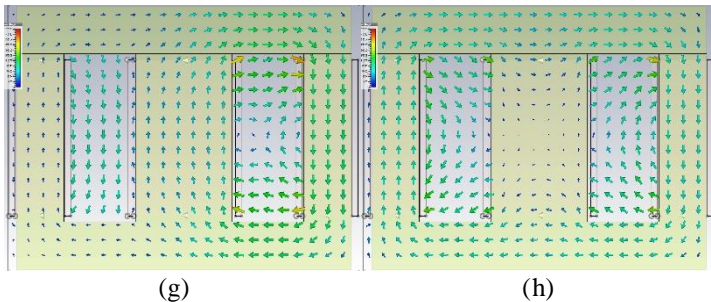
(c)

(d)



(e)

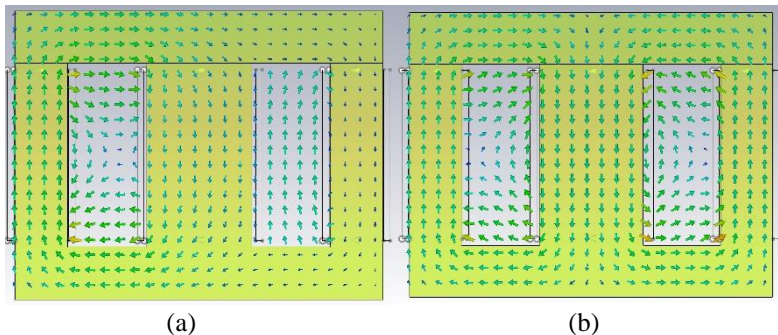
(f)



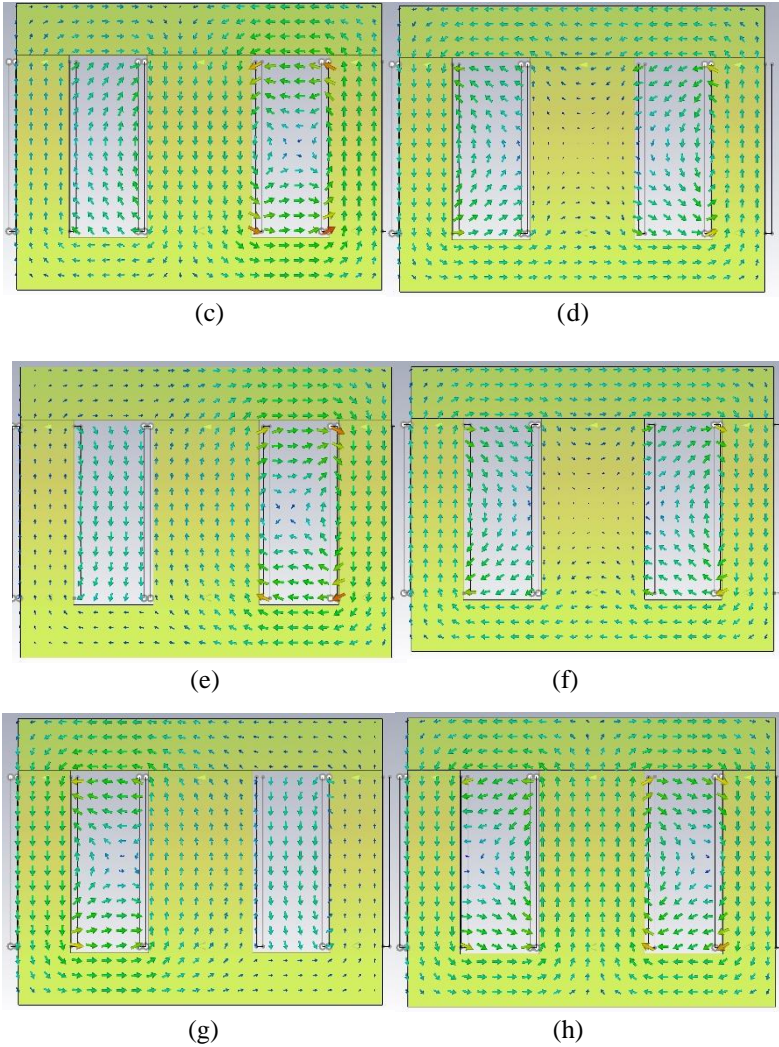
Gambar 4.6 Distribusi intensitas medan magnet transformator berlaminasi 2,5 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f); 300° (g); 330° (h)

Pada simulasi ketebalan laminasi 2,5 cm, besarnya intensitas medan magnet menjadi pembeda dengan inti transformator tanpa laminasi, karena arah aliran distribusinya hampir sama dengan obyek penelitian tanpa laminasi. Perbedaan besar nilai pada kedua obyek penelitian ini yang menyebabkan perbedaan bentuk kurva histerisis.

4.1.3.3 *Distribusi Intensitas Medan Magnet pada Inti dengan Ketebalan Laminasi 0,03 cm*

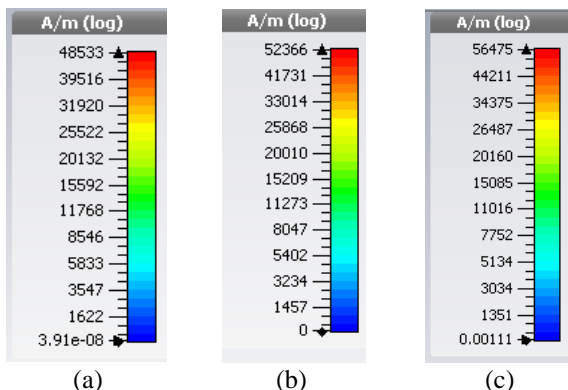


Gambar 4.7 Distribusi intensitas medan magnet transformator berlaminasi 0,03 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e); 240° (f); 300° (g); 330° (h)



Gambar 4.7 Distribusi intensitas medan magnet transformator berlaminasi 0,03 cm pada fasa 0° (a); 60° (b); 90° (c); 150° (d); 180° (e), 240° (f), 300° (g); 330° (h) (lanjutan)

Distribusi intensitas medan magnet pada fasa 60° masih terlihat tersebar rata ke seluruh inti transformator. Pada fasa 0°, distribusi intensitas medan magnet masih berada di kaki kiri transformator menuju kaki tengah melewati potongan I. Pada fasa 90° aliran distribusinya yang bernilai besar tersebar ke kaki kanan dan tengah. Kemudian pada fasa 150° titik tengah kaki tengah transformator tidak terdapat aliran distribusi intensitas medan magnet. Persebaran distribusi intensitas medan magnet pada fasa 180° masih terpusat pada kaki kiri dan tengah transformator. Mulai pada fasa 240° aliran distribusi intensitas medan magnet mulai tersebar secara merata dengan besar intensitasnya yang sama. Fasa 300° berkebalikan dengan fasa 180° dimana aliran distribusi intensitas medan magnet terpusat di kaki kanan dan tengah dengan arah aliran terbesarnya bergerak menuju kaki transformator bagian bawah. Fasa 330° memiliki kesamaan pola dengan fasa 150°, yaitu kaki transformator bagian tengah tidak terdistribusi intensitas medan magnet secara merata. Perbedaannya terdapat pada arah distribusi yang bergerak dari kaki kanan menuju kaki kiri. Dapat terlihat bahwa harga maksimal intensitas medan magnet terbesar berada pada inti transformator dengan laminasi 0,03 cm sebesar 56.474,3 A/m (log). Sedangkan pada transformator dengan laminasi 2,5 cm didapatkan harga maksimal intensitas medan magnetnya sebesar 52.365,9 A/m (log). Dan harga maksimal terkecil berada pada transformator tanpa laminasi, yaitu 48.533,4 A/m (log)



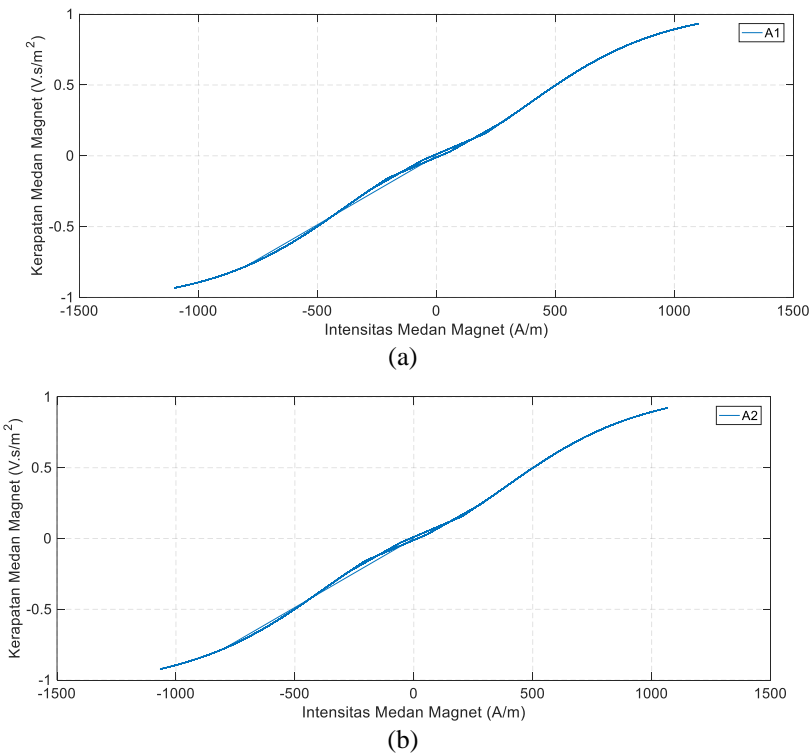
Gambar 4.8 Skala besar intensitas medan magnet pada transformator tanpa laminasi (a); dengan laminasi 2,5 cm (b); dengan laminasi 0,03 cm (c)

4.2 Perbandingan Kurva Histerisis dengan Variabel Ketebalan Laminasi

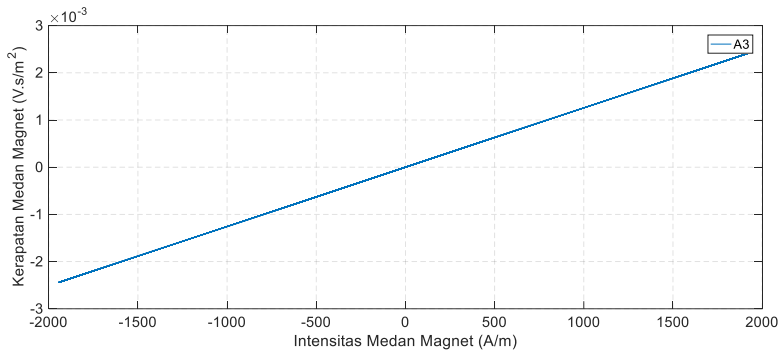
Telah ditetapkan titik monitor pada transformator untuk mengamati kurva histerisis yang terjadi pada masing-masing variabel ketebalan laminasi transformator. Pada masing-masing transformator dilakukan simulasi pada 39 titik. Sehingga satu variabel ketebalan laminasi memiliki 39 kurva magnetisasi. Berikut adalah perbandingan kurva histerisis dengan variasi ketebalan laminasi.

4.2.1 Kurva Histerisis pada Inti Transformator Tanpa Laminasi

4.2.1.1 Titik A



Gambar 4.9 Kurva histerisis pada titik A₁ (a); A₂ (b); dan A₃ (c) transformator tanpa laminasi



(c)

Gambar 4.9 Kurva histerisis pada titik A₁ (a); A₂ (b); dan A₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

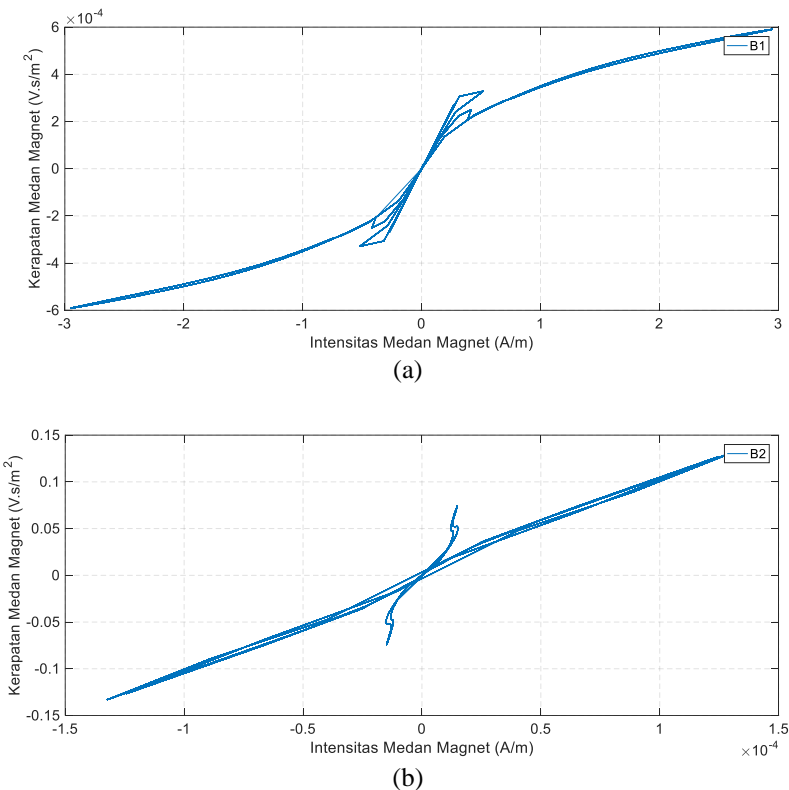
Hasil simulasi melalui Gambar 4.9, pada titik A₁ diperoleh nilai B_{\max} adalah sebesar 0,932136 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,93214 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,790379 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 1.099,795 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.099,791 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 879,2566 A/m. Pada titik A₂ didapatkan nilai B_{\max} adalah sebesar 0,921858 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,92186 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,782156 V.s/m². Sedangkan nilai H_{\max} adalah sebesar 1.065,137 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.065,14 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 858,2744 A/m. Pada titik A₃ diperoleh nilai B_{\max} adalah sebesar 0,002441 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,002441 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001638 V.s/m². Sedangkan nilai H_{\max} adalah sebesar 1.942,166 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.942,17 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.303,675 A/m.

Dari hasil simulasi di ketiga lokasi monitor titik A, terlihat bahwa pada titik A₃ memiliki kurva histerisis yang bentuknya cenderung menyerupai garis linier. Hal ini disebabkan kerapatan medan magnet pada titik tersebut sangat kecil, namun intensitas medan magnetnya bernilai paling besar. Sedangkan titik A₁ dan A₂ memiliki besar kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet yang nyaris sama, namun A₁ memiliki nilai B dan H yang lebih tinggi. Ringkasan nilai B-H di titik A dapat dilihat pada Tabel 4.1.

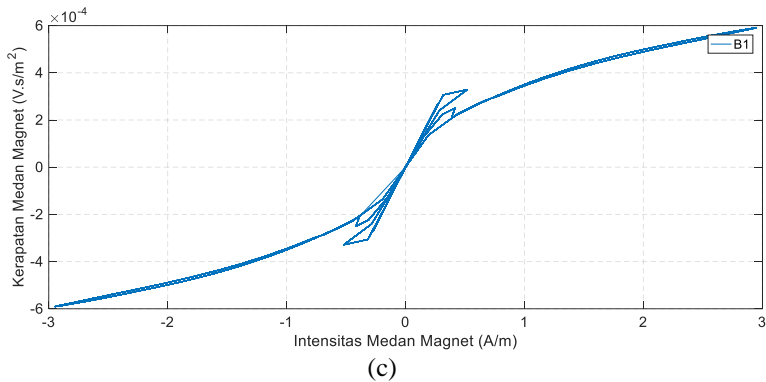
Tabel 4.1 Nilai B-H di titik A transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
A ₁	0,932	0,790	1.099,795	879,257
A ₂	0,922	0,782	1.065,137	858,274
A ₃	0,002	0,002	1.942,166	1.303,675

4.2.1.2 Titik B



Gambar 4.10 Kurva histeresis pada titik B₁ (a); B₂ (b); dan B₃ (c) transformator tanpa laminasi



Gambar 4.10 Kurva histeresis pada titik B₁ (a); B₂ (b); dan B₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

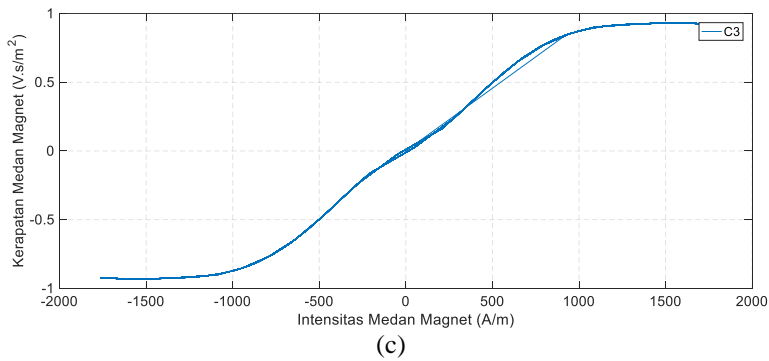
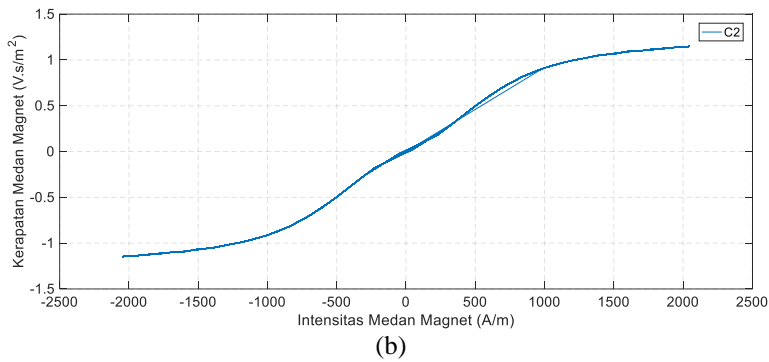
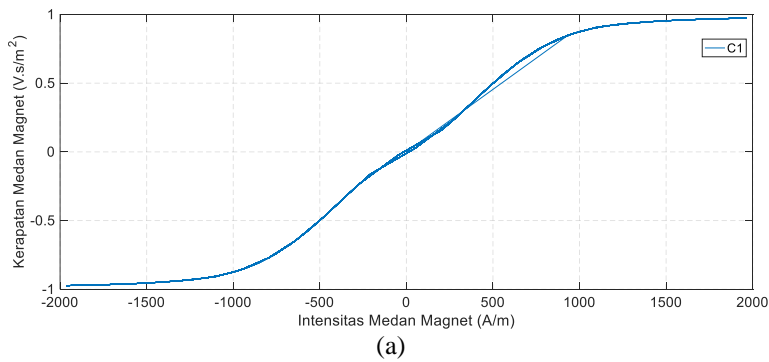
Pada titik B₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,000591 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,000591 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000385 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 2,9477 A/m, nilai H_{min} sebesar -2,9477 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,4168 A/m. B₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,0001323 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,000132 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 2,3 x 10⁻⁵ V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 0,13344 A/m, nilai H_{min} sebesar -0,13304 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 0,052284 A/m. B₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,002441 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,00244 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001638 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 3,170449 A/m, nilai H_{min} sebesar -3,17045 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,518345 A/m.

Dari ketiga kurva tersebut, dapat dianalisis bahwa titik B₃ dengan koordinat sumbu z=10 memiliki nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet terbesar. Dan pada titik B₂ nilai B-H nya sangat kecil dibandingkan titik B₁ dan B₂.

Tabel 4.2 Nilai B-H di titik B transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
B ₁	0,001	0,000	2,948	1,417
B ₂	0,000	0,000	0,133	0,052
B ₃	0,002	0,002	3,170	1,518

4.2.1.3 Titik C



Gambar 4.11 Kurva histerisis pada titik C₁ (a); C₂ (b); dan C₃ (c) transformator tanpa laminasi

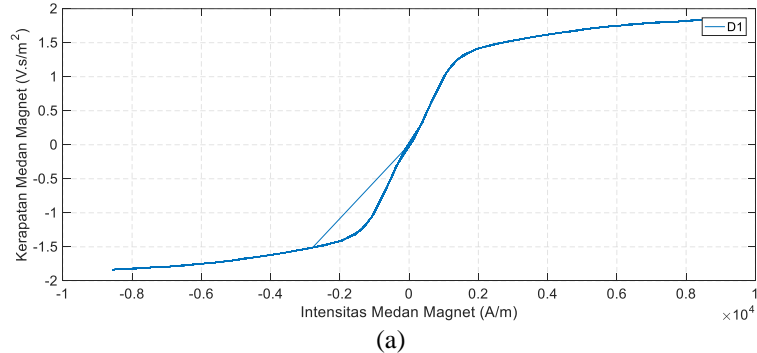
Pada titik C₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,973 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,973 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,840 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.942,382 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.942,382 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.347,105 A/m. C₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,146 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,146 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,945 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 2.045,253 A/m, nilai H_{min} sebesar -2.045,253 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.363,651 A/m. C₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,931 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,931 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,816 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.761,537 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.761,537 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.255,874 A/m.

Dari ketiga titik tersebut, titik C₂ memiliki kerapatan medan magnet dan titik saturasi yang lebih tinggi. Nilai intensitas medan magnet maksimal juga terjadi pada titik tersebut. Namun, berbeda dengan titik-titik sebelumnya, ketiga titik monitor C memiliki bentuk kurva histeresis yang hampir sama.

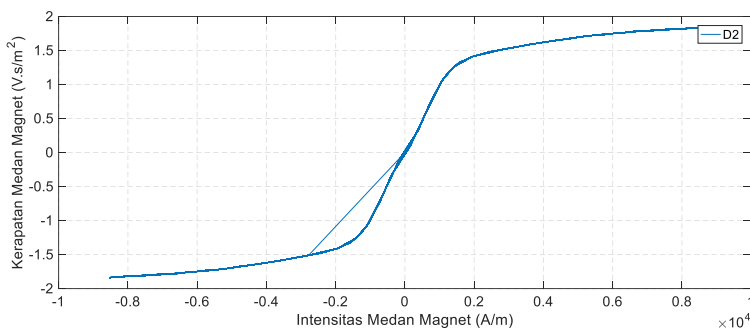
Tabel 4.3 Nilai B-H di titik C transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
C ₁	0,973	0,840	1.962,382	1.347,105
C ₂	1,146	0,945	2.045,253	1.363,651
C ₃	0,931	0,816	1.761,537	1.255,874

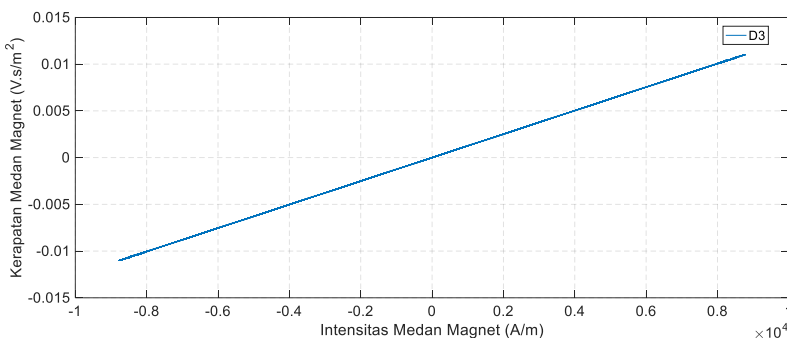
4.2.1.4 Titik D



Gambar 4.12 Kurva histeresis pada titik D₁ (a); D₂ (b); dan D₃ (c) transformator tanpa laminasi



(b)



(c)

Gambar 4.12 Kurva histeresis pada titik D₁ (a); D₂ (b); dan D₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

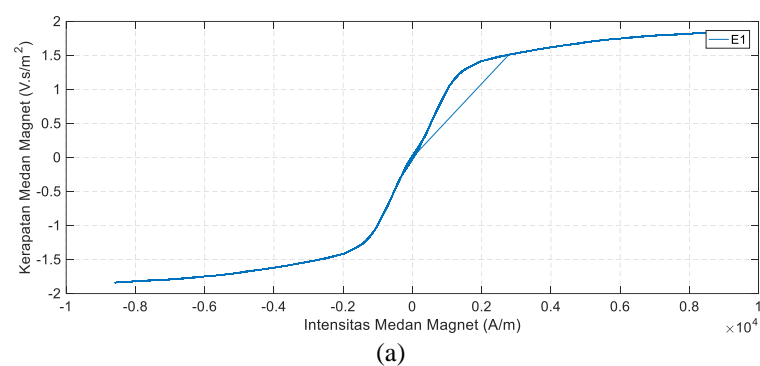
Pada titik D₁ nilai B_{\max} adalah sebesar $1,836 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,836 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $1,558 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $8.571,089 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-8.571,089 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $5.051,644 \text{ A/m}$. D₂ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $1,835 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,835 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $1,558 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $8.530,582 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-8.530,582 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $5.031,084 \text{ A/m}$. D₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,011 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,011 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,007 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $8.767,822 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-8.767,822 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $5.191,361 \text{ A/m}$.

Pada titik D terlihat pada koordinat sumbu $z=0$ dan $z=5$ memiliki kemiripan bentuk. Hal ini dikarenakan nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnetnya hampir sama. Secara berurutan nilai B_{\max} dan H_{\max} nya adalah 1,836 V.s/m² berbanding 1,835 V.s/m² dan 8.571,09 A/m berbanding 8.530,58 A/m. Sedangkan untuk titik D₃ nilai kerapatan medan magnetnya sangat kecil, 0,011 V.s/m² dengan nilai intensitas medan magnetnya paling besar, yaitu 8.767,82 A/m sehingga bentuk kurva histerisisnya mendekati bentuk garis linier.

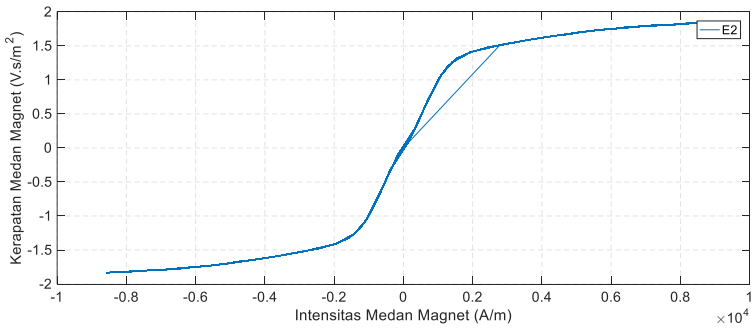
Tabel 4.4 Nilai B-H di titik D transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
D ₁	1,836	1,558	8.571,089	5.051,644
D ₂	1,835	1,558	8.530,582	5.031,084
D ₃	0,011	0,007	8.767,822	5.191,361

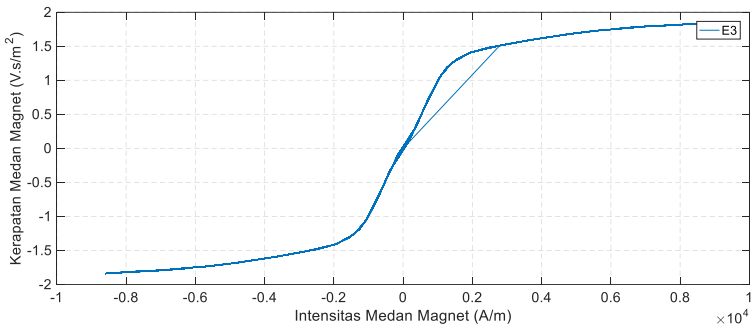
4.2.1.5 Titik E



Gambar 4.13 Kurva histerisis di titik E₁ (a); E₂ (b); E₃ (c) transformator tanpa laminasi



(b)



(c)

Gambar 4.13 Kurva histerisis di titik E₁ (a); E₂ (b); E₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

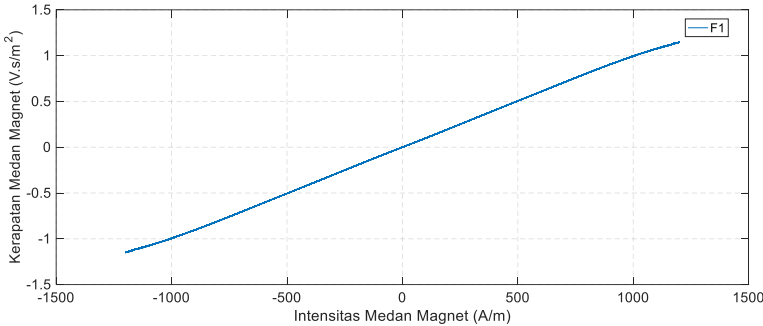
Pada titik E₁ nilai B_{\max} adalah sebesar 1,837 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,837 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,558 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 8.584,717 A/m, nilai H_{\min} sebesar -8.584,717 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.054,869 A/m. E₂ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 1,836 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,558 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,558 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 8.570,289 A/m, nilai H_{\min} sebesar -8.570,289 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.051,043 A/m. E₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 1,837 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,837 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,837 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 8.594,120 A/m, nilai B_{\min} sebesar -8.594,120 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.061,135 A/m.

Intensitas medan magnet dan kerapatan medan magnet pada titik E jauh lebih tinggi daripada titik C. Melalui Tabel 4.5, terlihat bahwa besar kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet pada titik E lebih merata daripada empat titik monitor sebelumnya.

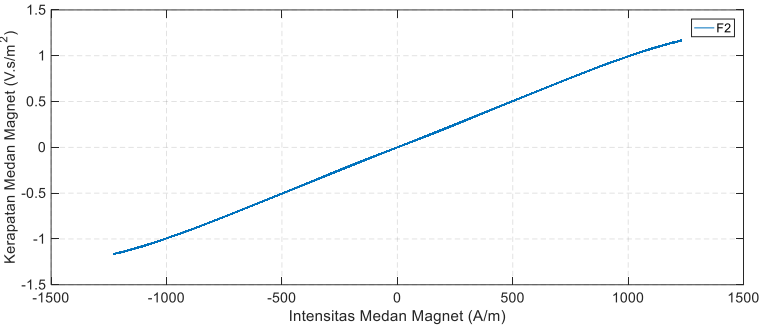
Tabel 4.5 Nilai B-H di titik E transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
E ₁	1,837	1,558	8.584,717	5.054,869
E ₂	1,836	1,558	8.570,289	5.051,043
E ₃	1,837	1,558	8.594,120	5.061,135

4.2.1.6 *Titik F*

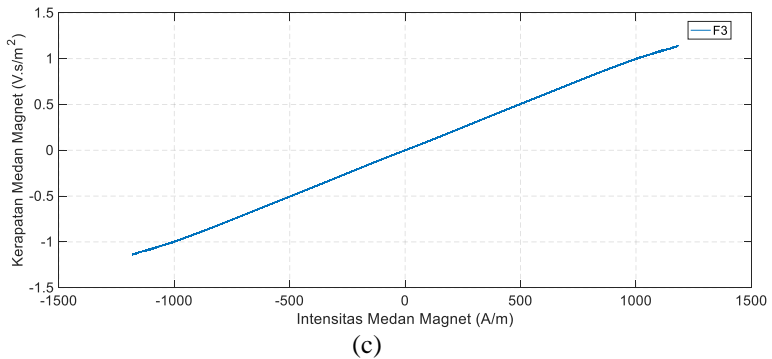


(a)



(b)

Gambar 4.14 Kurva histerisis di titik F₁ (a); F₂ (b); F₃ (c) transformator tanpa laminasi



Gambar 4.14 Kurva histerisis di titik F₁ (a); F₂ (b); F₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

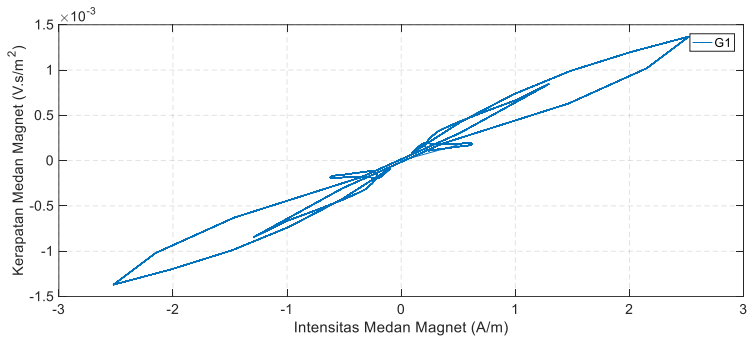
Pada titik F₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,147 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,147 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,506 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.199,254 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.199,254 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 515,595 A/m. F₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,165 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,165 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,530 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.228,597 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.228,597A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 542,969 A/m. F₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,135 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,135 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,501 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.180,774 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.180,774 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 509,085 A/m.

Berdasarkan hasil simulasi, pada titik F belum terlihat titik saturasi maupun *knee-point*, atau pada titik tersebut masih berada dalam daerah kerja transformator. Sehingga bentuk kurva yang terjadi hanya menyerupai garis linier. Besar nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet pada ketiga lokasi monitor juga memiliki nilai yang relatif sama, dengan F₂ memili nilai B-H tertinggi.

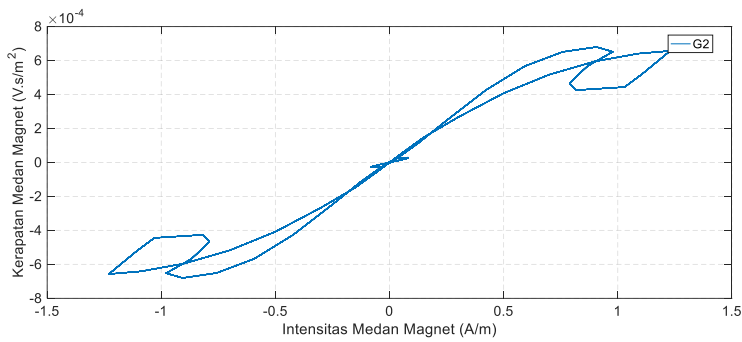
Tabel 4.6 Nilai B-H di titik F transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
F ₁	1,147	0,506	1.199,254	515,595
F ₂	1,165	0,530	1.228,597	542,969
F ₃	1,135	0,501	1.180,774	509,085

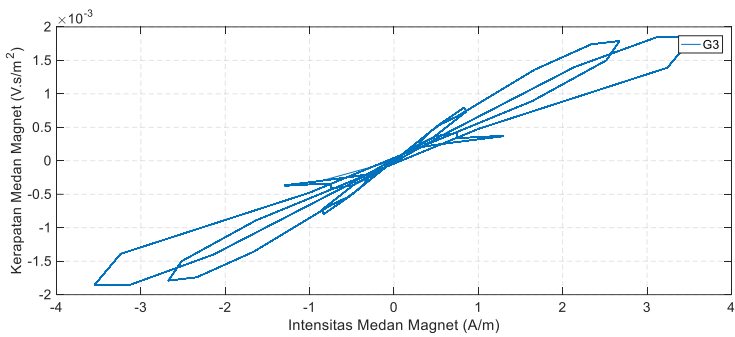
4.2.1.7 Titik G



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.15 Kurva histeresis di titik G_1 (a); G_2 (b); dan G_3 (c) transformator tanpa laminasi

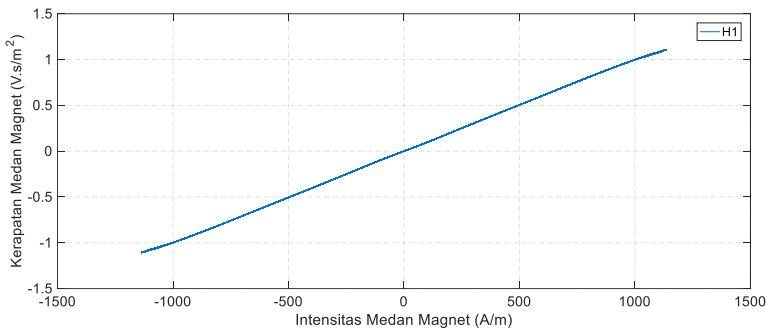
Pada titik G_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $0,001372 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,001372 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,000316 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $2,522 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-2,522 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $0,614 \text{ A/m}$. G_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,00068 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,00068 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,00019 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1,230 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1,230 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $0,294 \text{ A/m}$. G_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,001853 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,001853 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,00058 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $3,546 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-3,546 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $1,141 \text{ A/m}$.

Titik G berada di kaki tengah transformator. Dari hasil simulasi terlihat bahwa bentuk kurva histeresisnya tidak beraturan. Nilai intensitas medan magnet dan kerapatan medan magnet terbesar berada pada titik G_3 . Dapat dianalisis, nilai B dan H kecil adalah terdapat kelipatan fasa dimana arah aliran distribusi fluks menjauhi kaki tengah transformator.

Tabel 4.7 Nilai B-H di titik G transformator tanpa laminasi

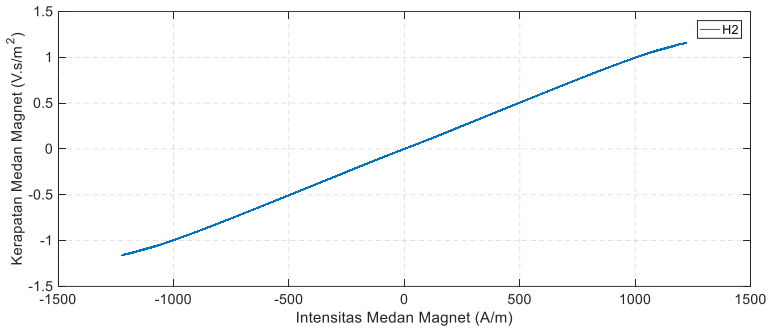
Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
G_1	0,001	0,000	2,522	0,614
G_2	0,001	0,000	1,230	0,294
G_3	0,002	0,001	3,546	1,141

4.2.1.8 Titik H

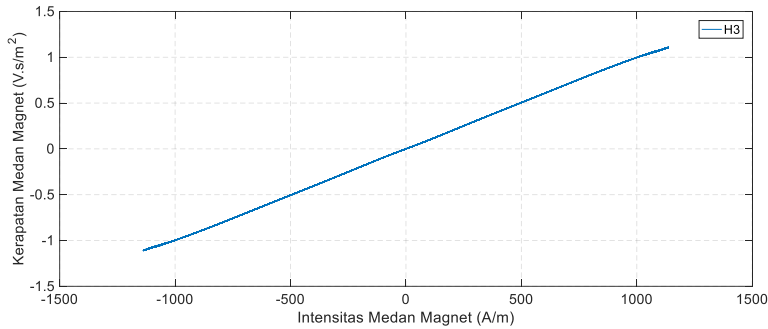


(a)

Gambar 4.16 Kurva histeresis di titik H_1 (a); H_2 (b); H_3 (c) transformator tanpa laminasi



(b)



(c)

Gambar 4.16 Kurva histeresis di titik H₁ (a); H₂ (b); H₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

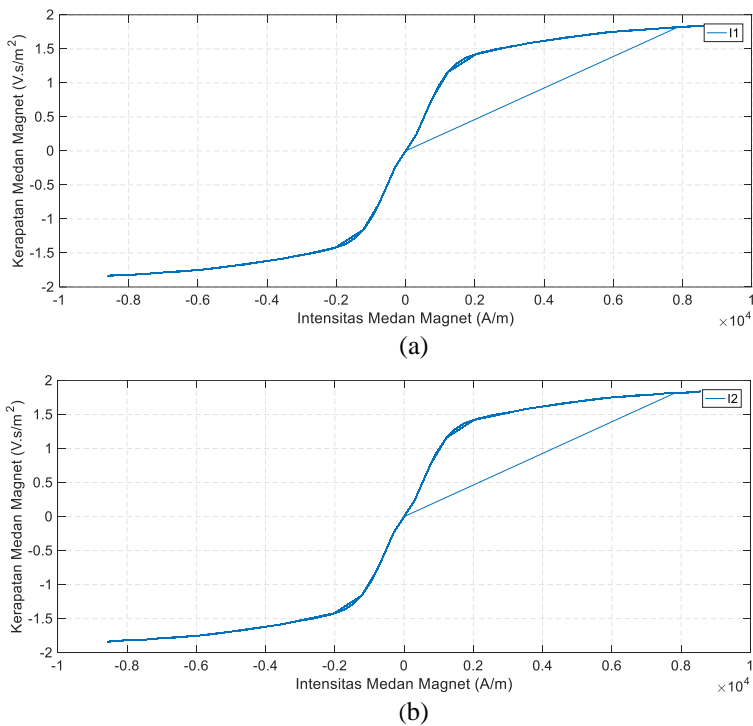
Pada titik H₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,105 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,105 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,485 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.136,731 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.136,731 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 490,716 A/m. H₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,161 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,161 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,519 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.221,832 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.221,832 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 530,618 A/m. G₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,106 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,106 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,485 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.137,507 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.137,507 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 490,1988 A/m.

Dapat dianalisis bahwa titik H dan titik F memiliki kesamaan karakteristik karena koordinatnya berada di kaki tengah transformator sebagai daerah yang dilewati bersama oleh aliran distribusi fluks dari kaki kanan dan kiri transformator. Titik H dan F memiliki kurva histerisis yang titik saturasinya belum terlihat.

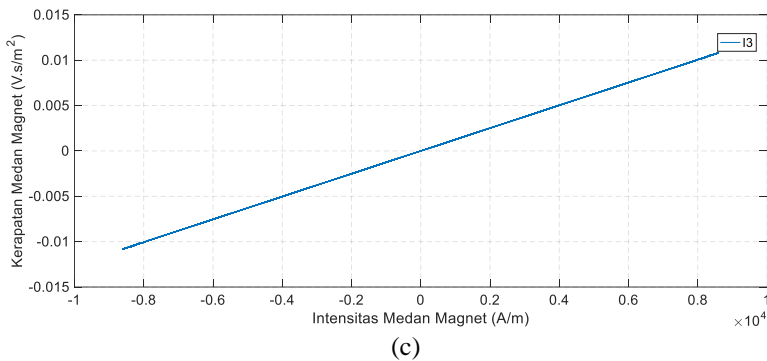
Tabel 4.8 Nilai B-H di titik H transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
H ₁	1,105	0,485	1.136,731	490,716
H ₂	1,161	0,519	1.221,832	530,618
H ₃	1,106	0,485	1.137,507	490,198

4.2.1.9 Titik I



Gambar 4.17 Kurva histerisis di titik I₁ (a); I₂ (b); I₃ (c) transformator tanpa laminasi



Gambar 4.17 Kurva histerisis di titik I₁ (a); I₂ (b); I₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

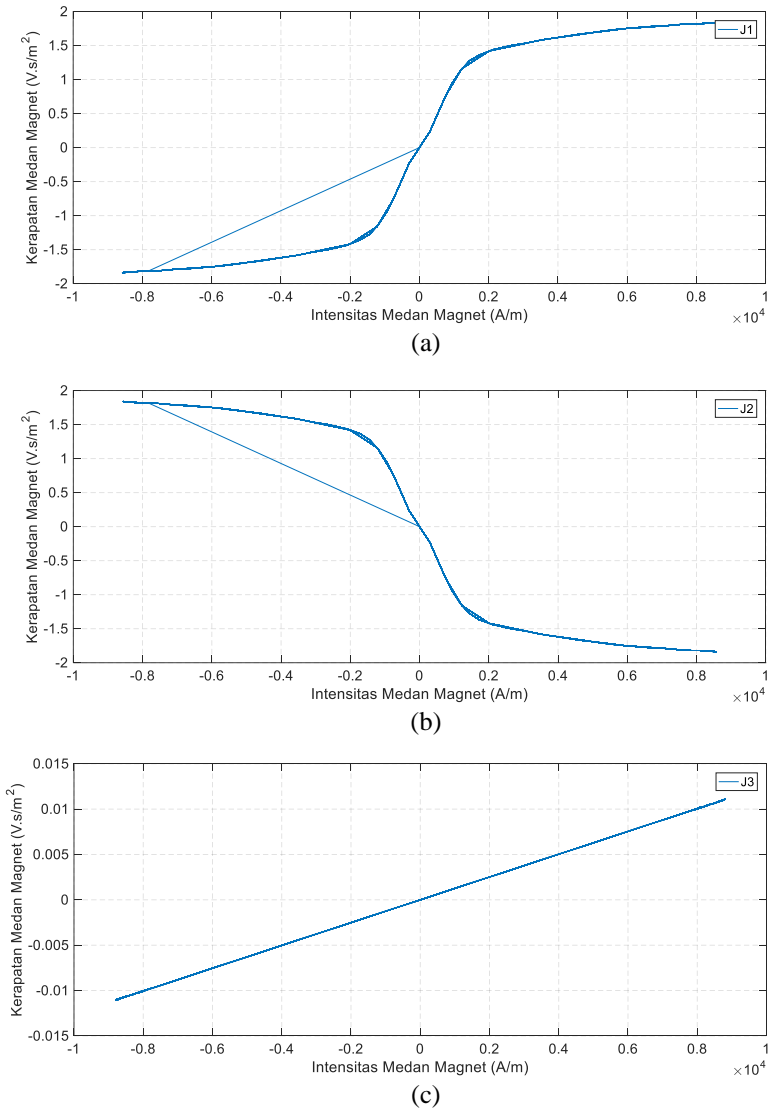
Pada titik I₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,837 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,837 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,565 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.591,411 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.591,411 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.086,487 A/m. I₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,836 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,836 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,564 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.557,311 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.557,311 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.069,384 A/m. I₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,011 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,011 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,006 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.596,096 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.596,096 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.089,211 A/m.

Pada simulasi titik I, nilai intensitas medan magnet terbesar berada pada I₃, sedangkan nilai kerapatan medan magnet terbesar berada pada I₁. Kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet pada sumbu z 0 dan 5 memiliki nilai yang hampir sama. Hal ini dapat diartikan bahwa kerapatan medan magnet terbesar di titik I cenderung mendekati permukaan sumbu z=0.

Tabel 4.9 Nilai B-H di titik I transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
I ₁	1,837	1,565	8.591,411	5.086,487
I ₂	1,836	1,564	8.557,311	5.069,384
I ₃	0,011	0,006	8.596,096	5.089,211

4.2.1.10 Titik J



Gambar 4.18 Kurva histeresis pada titik J₁ (a); J₂ (b); J₃ (c) transformator tanpa laminasi

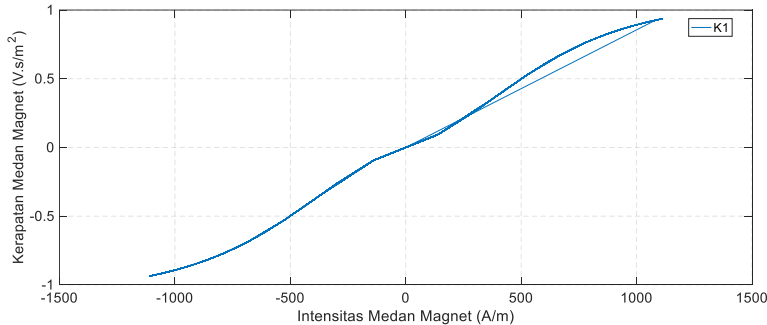
Pada titik J₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,836 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,836 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,564 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.577,488 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.577,488 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.075,506 A/m. J₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,836 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,836 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,564 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.564,003 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.564,003 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.068,930 A/m. J₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,011 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,011 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,007 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.797,737 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.797,737 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.202,882 A/m.

Fenomena unik terjadi pada titik J₂ dimana bentuk kurva histerisisnya terbalik, atau tidak berbentuk mendekati kurva histerisis pada umumnya. Hal ini dapat terjadi karena gaya gerak magnet koersifnya bernilai negatif. Sedangkan pada titik J₃ nilai intensitas medan magnetnya jauh lebih besar daripada nilai kerapatan medan magnetnya, sehingga bentuk kurva histerisisnya menyerupai garis linier.

Tabel 4.10 Nilai B-H di titik J transformator tanpa laminasi

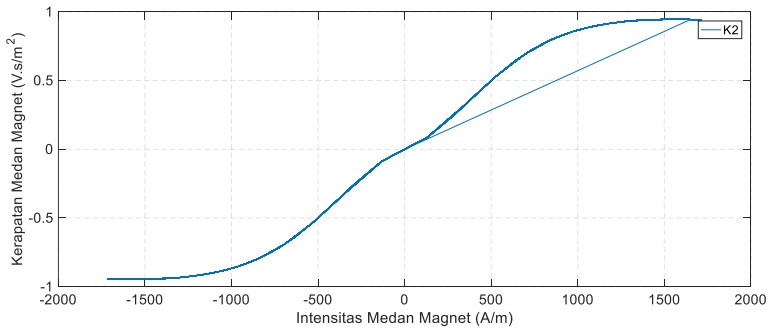
Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
J ₁	1,836	1,564	8.577,488	5.075,506
J ₂	1,836	1,564	8.564,003	5.068,930
J ₃	0,011	0,007	8.797,737	5.202,882

4.2.1.11 Titik K

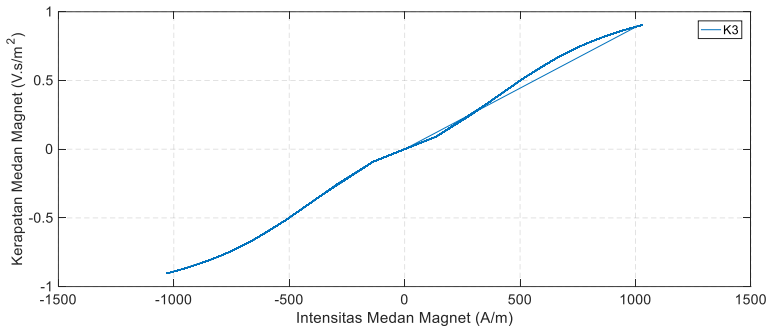


(a)

Gambar 4.19 Kurva histerisis di titik K₁ (a); K₂ (b); dan K₃ (c) transformator tanpa laminasi



(b)



(c)

Gambar 4.19 Kurva histeresis di titik K_1 (a); K_2 (b); dan K_3 (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

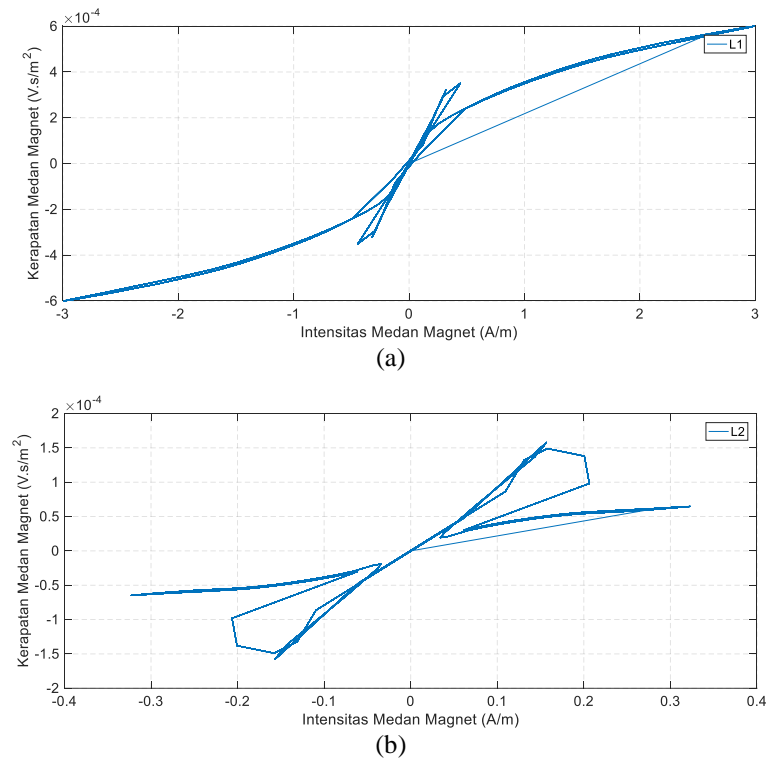
Pada titik K_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $0,93475 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,93475 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,790 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.107,249 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.107,249 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $879,921 \text{ A/m}$. K_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,946 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,946 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,822 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.713,222 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.713,222 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $1.220,594 \text{ A/m}$. K_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,902 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,902 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,764 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.027,062 \text{ A/m}$, nilai B_{\min} sebesar $-1.027,062 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $829,965 \text{ A/m}$.

Nilai intensitas medan magnet terbesar berada pada titik K_2 yaitu 1.713,22 A/m. Secara berurutan, besar nilai kerapatan medan magnet di tiap titik monitor adalah 0,93475 V.s/m², 0,946115 V.s/m², dan 0,902018 V.s/m².

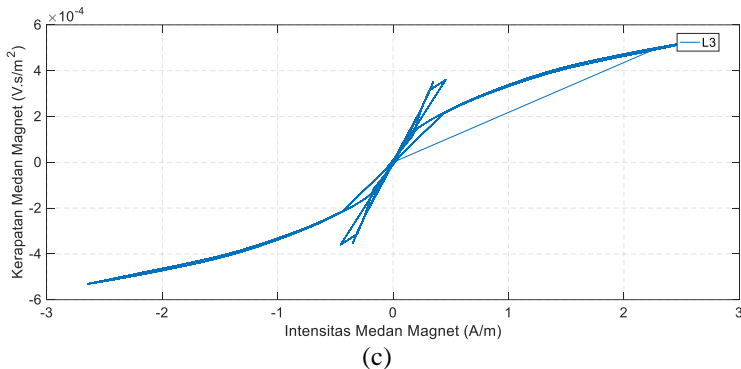
Tabel 4.11 Nilai B-H di titik K transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
K_1	0,935	0,790	1.107,249	879,921
K_2	0,946	0,822	1.713,222	1.220,594
K_3	0,902	0,764	1.027,062	829,965

4.2.1.12 Titik L



Gambar 4.20 Kurva histeresis di titik L_1 (a); L_2 (b); dan L_3 (c) transformator tanpa laminasi



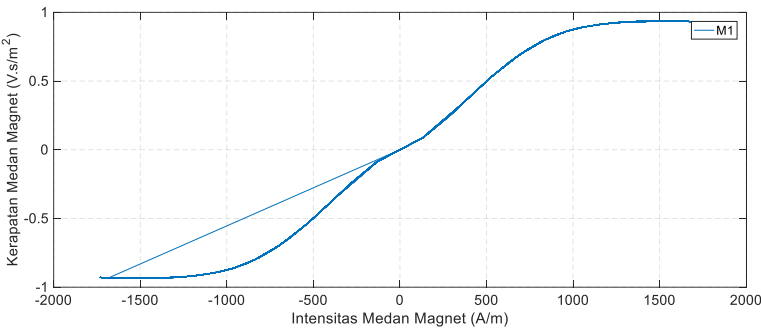
Gambar 4.20 Kurva histeresis di titik L₁ (a); L₂ (b); dan L₃ (c) transformator tanpa laminasi (lanjutan)

Nilai kerapatan medan magnet paling besar di titik L₁, yaitu 0,0006 V.s/m², diikuti oleh L₃ dan L₂ masing-masing sebesar 0,000531 V.s/m² serta 0,000158 V.s/m². Nilai intensitas medan magnet terbesar pada titik L juga berada di sumbu z=0, yaitu sebesar 2,990534 A/m. Sumbu z=10 memiliki bentuk yang mirip dengan L₁ dikarenakan nilai intensitas medan magnetnya juga tidak jauh berbeda, yakni 2,64693 A/m. Apabila kurva histeresis di titik L₂ digabungkan dengan kedua titik monitor lainnya, maka kurva tersebut tidak akan terlihat dikarenakan nilai intensitas medan magnet dan kerapatan medan magnet di koordinat sumbu z=5 sangatlah kecil.

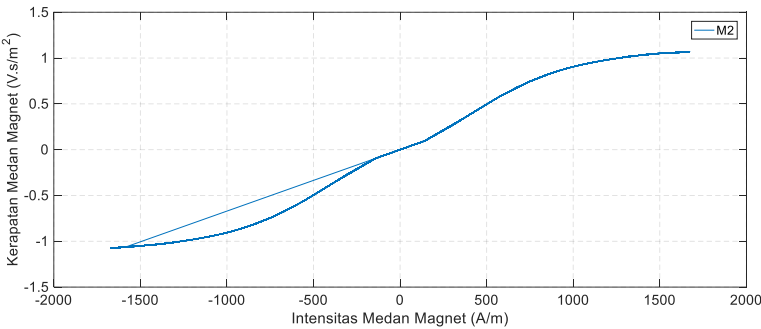
Tabel 4.12 Nilai B-H di titik L transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
L ₁	0,001	0,000	2,991	1,445
L ₂	0,000	0,000	0,323	0,185
L ₃	0,001	0,000	2,647	1,291

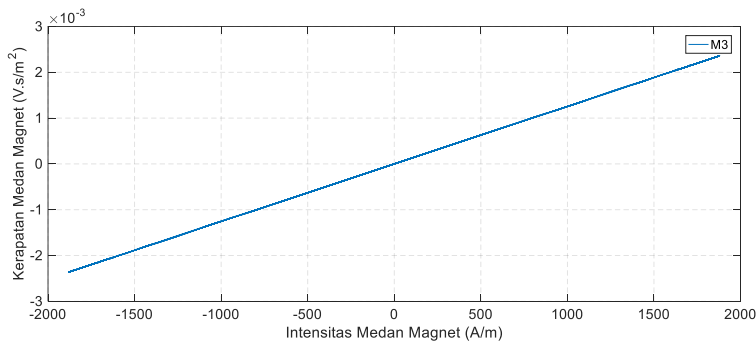
4.2.1.13 Titik M



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.21 Kurva histeresis di titik M₁ (a); M₂ (b); dan M₃ (c) transformator tanpa laminasi

Dari hasil simulasi, kurva M_3 memiliki kecenderungan bentuk seperti garis linier. Telah dijelaskan sebelumnya, hal ini dapat terjadi karena kerapatan medan magnet di titik tersebut kecil, dibandingkan nilai intensitas medan yang sangat besar yaitu $0,002361 \text{ V.s/m}^2$ berbanding $1.878,987 \text{ A/m}$. Titik M_1 dan M_3 memiliki bentuk kurva yang mirip. Namun, terdapat sedikit perbedaan yang diakibatkan oleh besar intensitas medan magnet di titik M_1 lebih besar daripada M_3 yaitu, $1.732,086 \text{ A/m}$ berbanding $1.672,127 \text{ A/m}$. Selain itu, besar kerapatan medan magnet di titik koordinat M_1 lebih kecil dibandingkan M_3 , yaitu $0,935577 \text{ V.s/m}^2$ dibandingkan $1,027265 \text{ V.s/m}^2$.

Tabel 4.13 Nilai B-H di titik M transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
M ₁	0,936	0,818	1.732,086	1.234,610
M ₂	1,073	0,894	1.672,127	1.178,008
M ₃	0,002	0,002	1.878,987	1.274,900

Setelah dilakukan simulasi, nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet pada masing-masing titik monitor dapat diketahui. Berikut adalah ringkasan nilai B-H pada titik monitor inti transformator tanpa laminasi.

Tabel 4.14 Ringkasan nilai B-H pada transformator tanpa laminasi

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
A ₁	0,932	0,790	1.099,795	879,257
A ₂	0,922	0,782	1.065,137	858,274
A ₃	0,002	0,002	1.942,166	1.303,675
B ₁	0,001	0,000	2,948	1,417
B ₂	0,000	0,000	0,133	0,052
B ₃	0,002	0,002	3,170	1,518
C ₁	0,973	0,840	1.962,382	1.347,105
C ₂	1,146	0,945	2.045,253	1.363,651
C ₃	0,931	0,816	1.761,537	1.255,874
D ₁	1,836	1,558	8.571,089	5.051,644
D ₂	1,835	1,558	8.530,582	5.031,084
D ₃	0,011	0,007	8.767,822	5.191,361
E ₁	1,837	1,558	8.584,717	5.054,869
E ₂	1,836	1,558	8.570,289	5.051,043
E ₃	1,837	1,558	8.594,120	5.061,135

Tabel 4.14 Ringkasan nilai B-H pada masing-masing titik pada transformator tanpa laminasi (lanjutan)

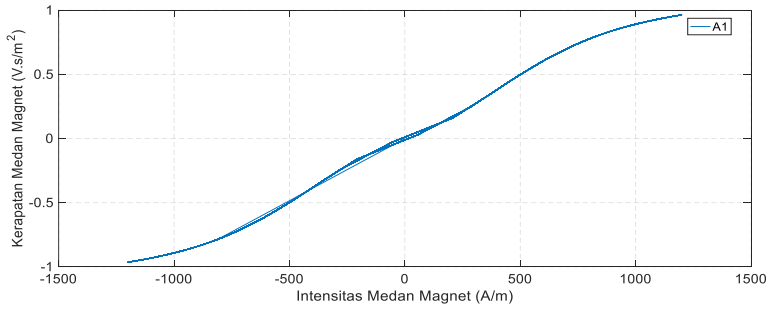
Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
F ₁	1,147	0,506	1.199,254	515,595
F ₂	1,165	0,530	1.228,597	542,969
F ₃	1,135	0,501	1.180,774	509,085
G ₁	0,001	0,000	2,522	0,614
G ₂	0,001	0,000	1,230	0,294
G ₃	0,002	0,001	3,546	1,141
H ₁	1,105	0,485	1.136,731	490,716
H ₂	1,161	0,519	1.221,832	530,618
H ₃	1,106	0,485	1.137,507	490,198
I ₁	1,837	1,565	8.591,411	5.086,487
I ₂	1,836	1,564	8.557,311	5.069,384
I ₃	0,011	0,006	8.596,096	5.089,211
J ₁	1,836	1,564	8.577,488	5.075,506
J ₂	1,836	1,564	8.564,003	5.068,930
J ₃	0,011	0,007	8.797,737	5.202,882
K ₁	0,935	0,790	1.107,249	879,921
K ₂	0,946	0,822	1.713,222	1.220,594
K ₃	0,902	0,764	1.027,062	829,965
L ₁	0,001	0,000	2,991	1,445
L ₂	0,000	0,000	0,323	0,185
L ₃	0,001	0,000	2,647	1,291
M ₁	0,936	0,818	1.732,086	1.234,610
M ₂	1,073	0,894	1.672,127	1.178,008
M ₃	0,002	0,002	1.878,987	1.274,900

Keterangan: Pembulatan dilakukan 3 angka di belakang koma

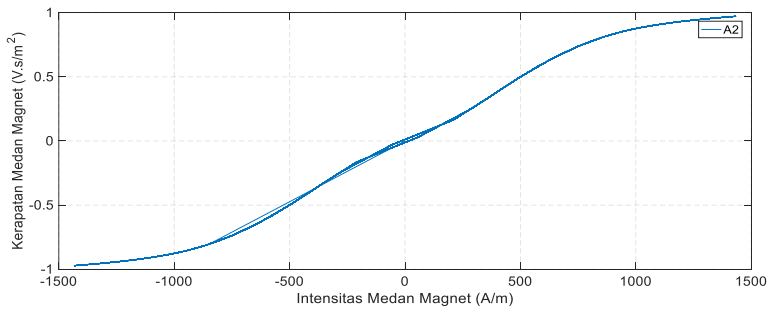
Pada transformator tanpa laminasi, nilai kerapatan medan magnet terbesar B_{\max} berada pada titik E₁ dan E₃ atau koordinat x= 7; y= 20; z=0 dan z=10, sebesar 1,837 V.s/m². Setelah pembulatan, ada dua titik lainnya yang memiliki nilai serupa, yaitu E₁ dan I₁. Kemudian rerata absolut B_{avg} berada pada titik I₁, yakni sebesar 1,565 V.s/m². Sedangkan untuk nilai intensitas medan magnet terbesar sekaligus rerata absolutnya berada pada titik J₃, yaitu masing-masing sebesar 8.798,737 A/m serta 5.202,882 A/m.

4.2.2 Kurva Histerisis pada Inti Transformator dengan Laminasi 2,5 cm

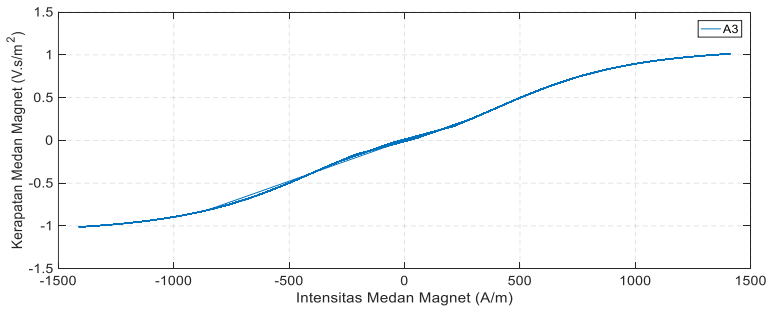
4.2.2.1 Titik A



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.22 Kurva histerisis di titik A₁ (a); A₂ (b); dan A₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm

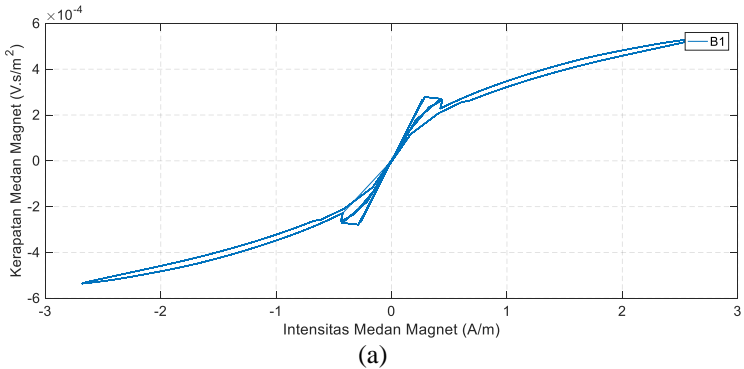
Pada titik A₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,964 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,964 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,807 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.198,988 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.198,988 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 925,077 A/m. A₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,972 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,972 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,819 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.432,287 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.432,287 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.034,978 A/m. A₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,012 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,012 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,846 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.409,409 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.409,409 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.034,756 A/m.

Yang membedakan ketiga kurva histerisis secara signifikan adalah besar kerapatan medan magnetnya. Hal ini terlihat jelas di titik A₃, dimana pada titik tersebut nilai maksimal kerapatan medan magnetnya mencapai 1,0124 V.s/m². Selain itu, titik A₁ memiliki nilai intensitas medan magnet terkecil, yaitu 1.198,98 A/m.

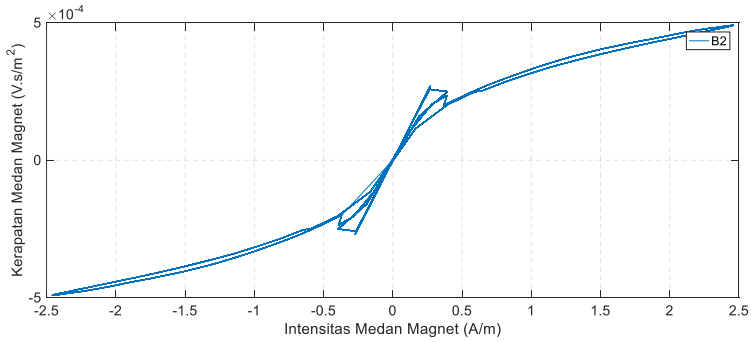
Tabel 4.15 Nilai B-H di titik A transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
A ₁	0,964	0,807	1.198,988	925,077
A ₂	0,972	0,819	1.432,287	1.034,978
A ₃	1,012	0,846	1.409,409	1.034,756

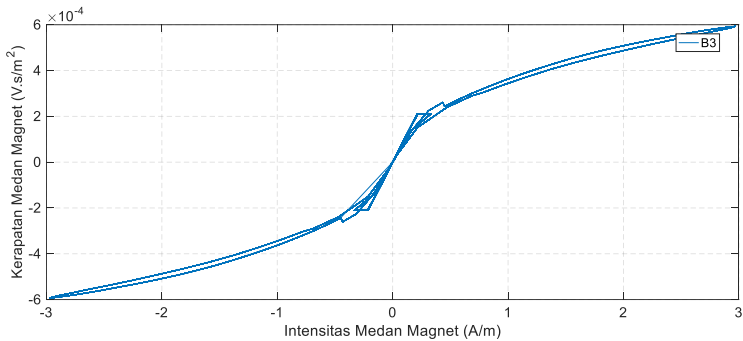
4.2.2.2 Titik B



Gambar 4.23 Kurva histerisis di titik B₁ (a); B₂ (b); dan B₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



(b)



(c)

Gambar 4.23 Kurva histerisis di titik B₁ (a); B₂ (b); dan B₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

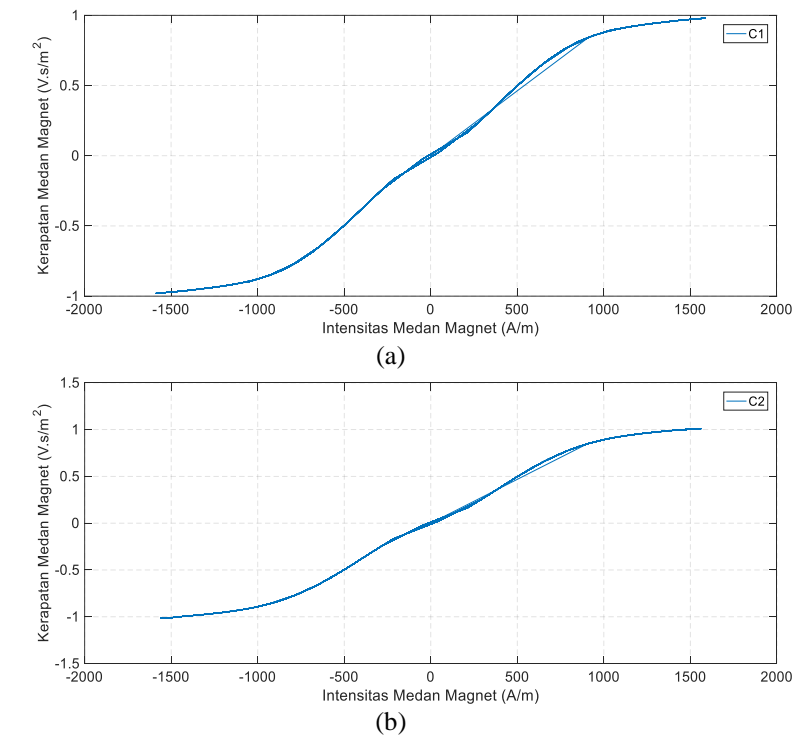
Pada titik B₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,000536 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,000536 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000357 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 2,682683 A/m, nilai H_{min} sebesar -2,682682 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,310481 A/m. B₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,000491 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,000491 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000329 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 2,45838 A/m, nilai H_{min} sebesar -2,45838 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,204114 A/m. B₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,000593 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,000593 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000385 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 2,969262 A/m, nilai H_{min} sebesar -2,96926 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,439582 A/m.

Secara kasat mata, ketiga kurva tersebut memiliki pola yang sama. Namun, apabila ditinjau dari skala yang sama, ketiganya jelas berbeda. Nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet terbesar berada di titik B₃ dengan nilai secara berurutan adalah 0,000593 V.s/m² dan 2,9692 A/m. Sedangkan, yang memiliki nilai terkecil adalah titik B₂.

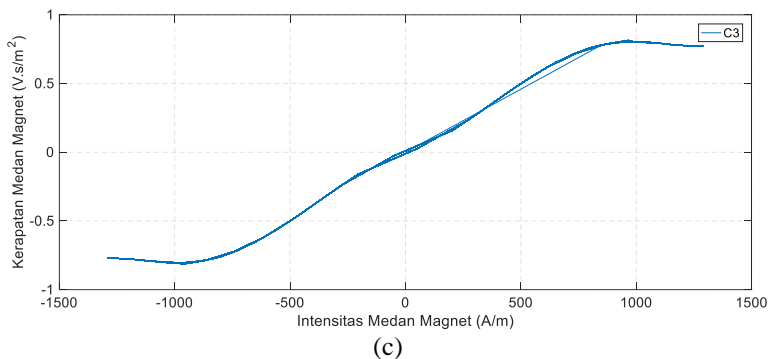
Tabel 4.16 Nilai B-H di titik B transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
B ₁	0,001	0,000	2,683	1,310
B ₂	0,000	0,000	2,458	1,204
B ₃	0,001	0,000	2,969	1,440

4.2.2.3 Titik C



Gambar 4.24 Kurva histerisis di titik C₁ (a); C₂ (b); dan C₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



Gambar 4.24 Kurva histerisis di titik C_1 (a); C_2 (b); dan C_3 (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

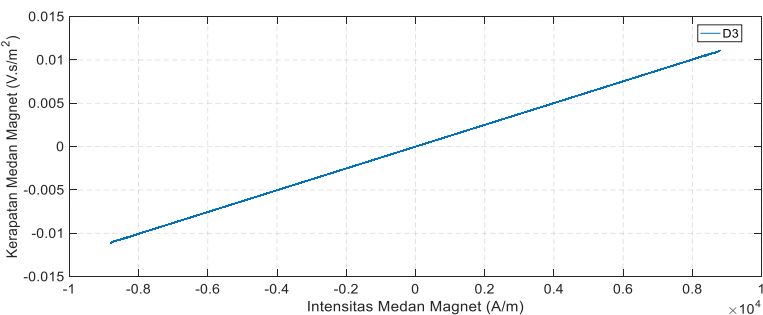
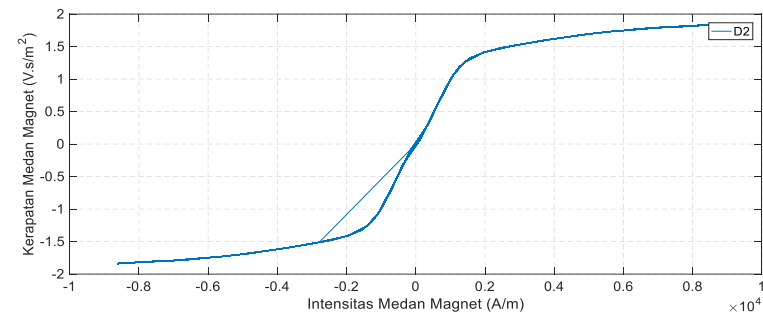
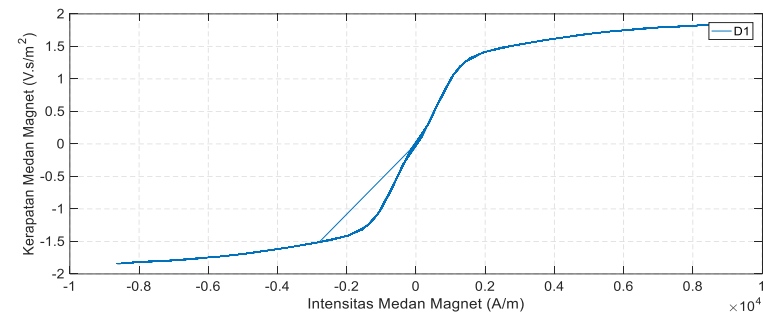
Pada titik C_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $0,980 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,980 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,838 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.586,526 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.586,526 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $1.150,202 \text{ A/m}$. C_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $1,014 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,014 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,858 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.561,221 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.561,221 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $1.134,377 \text{ A/m}$. C_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,814 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,814 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,710 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.289,556 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.289,556 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $980,225 \text{ A/m}$.

Titik C_2 memiliki tingkat kerapatan medan magnet paling besar diantara dua titik lainnya, yaitu sebesar $1.586,52 \text{ A/m}$. Namun, titik C_1 memiliki intensitas medan magnet terbesar, yaitu $1,014 \text{ V.s/m}^2$. Sembilan titik monitor transformator dengan laminasi 2,5 cm memiliki perbandingan intensitas medan magnet dan kerapatan medan magnet yang lebih merata daripada transformator tanpa laminasi.

Tabel 4.17 Nilai B-H di titik C transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m^2)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m^2)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
C_1	0,980	0,838	1.586,526	1.150,202
C_2	1,014	0,858	1.561,221	1.134,377
C_3	0,814	0,710	1.289,556	980,225

4.2.2.4 Titik D



Gambar 4.25 Kurva histeresis pada titik D₁ (a), D₂ (b); dan D₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm

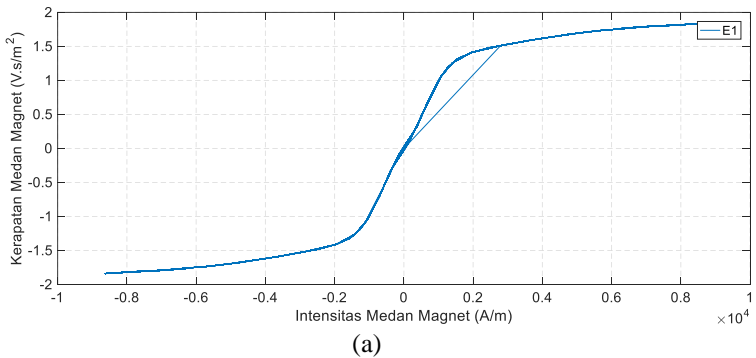
Pada titik D₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,838 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,838 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,559 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.630,251 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.630,251 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.079,608 A/m. D₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,837 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,837 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,559 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.618,456 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.618,456 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.071,906 A/m. D₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,011 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,011 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,007 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.801,502 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.801,502 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.200,755 A/m.

Pada simulasi di titik D, terdapat ketimpangan besar kerapatan medan magnet, tepatnya di titik D₃. Besar di titik D jauh lebih kecil daripada kedua titik lainnya, yaitu 0,011 V.s/m². Sehingga bentuk kurva histerisisnya mendekati bentuk garis linier. Hal ini dikarenakan kenaikan intensitas medan magnet pada titik tersebut tidak sebanding dengan kenaikan kerapatan medan magnetnya.

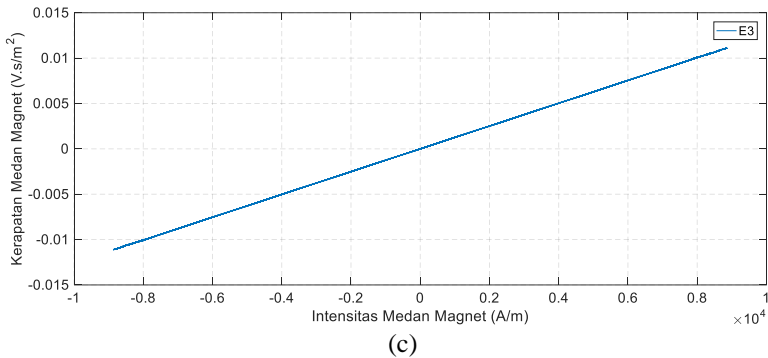
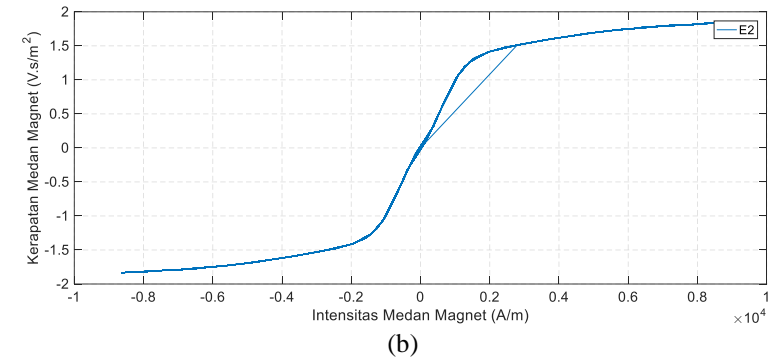
Tabel 4.18 Nilai B-H di titik D transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
D ₁	1,838	1,559	8.630,251	5.079,608
D ₂	1,837	1,559	8.618,456	5.071,906
D ₃	0,011	0,007	8.801,502	5.200,755

4.2.2.5 Titik E



Gambar 4.26 Kurva histerisis di titik E₁ (a); E₂ (b); dan E₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



Gambar 4.26 Kurva histerisis di titik E₁ (a); E₂ (b); dan E₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

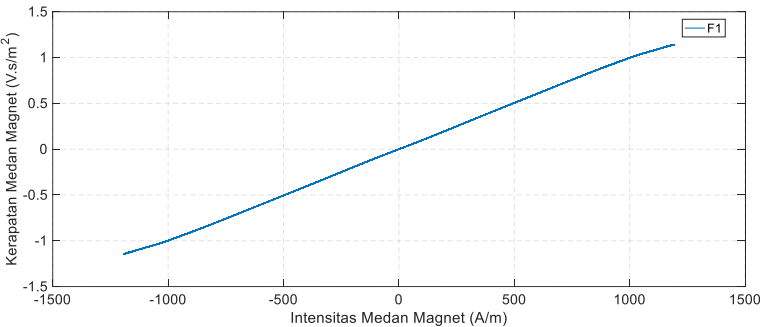
Pada titik E₁ nilai B_{\max} adalah sebesar 1,838 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,838 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,559 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 8.624,051 A/m, nilai H_{\min} sebesar -8.624,051 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.076,145 A/m. E₂ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 1,837 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,837 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,559 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 8.618,996 A/m, nilai H_{\min} sebesar -8.618,996 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.074,241 A/m. E₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,011 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,011 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,007 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 8.854,797 A/m, nilai H_{\min} sebesar -8.854,797 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.251,631 A/m.

Selanjutnya simulasi di titik E yang memiliki pola yang sama dengan titik D. Terdapat ketimpangan besar kerapatan medan magnet, tepatnya di titik E₃. Besar di titik D jauh lebih kecil daripada kedua titik lainnya, yaitu 0,0111 V.s/m². Sehingga bentuk kurva histerisisnya mendekati bentuk garis linier.

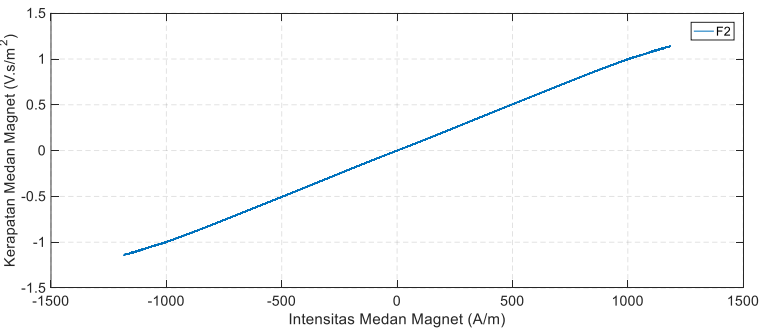
Tabel 4.19 Nilai B-H di titik E transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
E ₁	1,838	1,559	8.624,051	5.076,145
E ₂	1,837	1,559	8.618,996	5.074,241
E ₃	0,011	0,007	8.854,797	5.251,631

4.2.2.6 Titik F

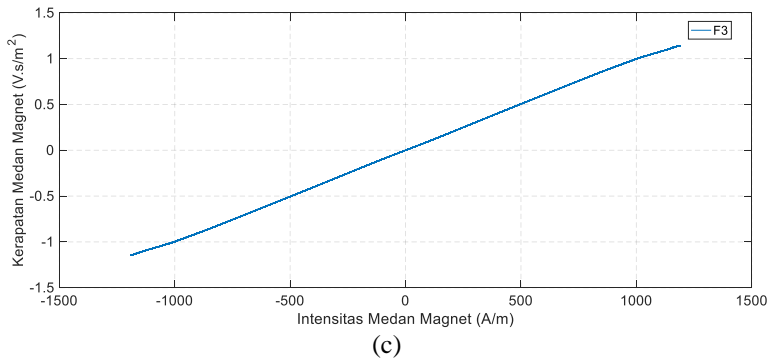


(a)



(b)

Gambar 4.27 Kurva histerisis pada titik F₁ (a); F₂ (b); dan F₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



Gambar 4.27 Kurva histeresis pada titik F₁ (a); F₂ (b); dan F₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

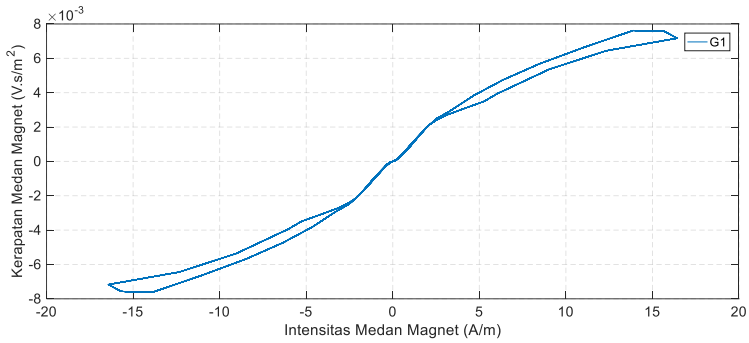
Pada titik F₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,143 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,143 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,506 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.192,716 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.192,716 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 514,928 A/m. F₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,136 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,136 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,508 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.182,197 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.182,197 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 515,524 A/m. F₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,140 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,140 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,508 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.188,875 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.188,875 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 516,953 A/m.

Ditinjau hasil simulasi, pada titik F belum terlihat titik saturasi maupun *knee-point*. Pada titik tersebut masih berada dalam daerah kerja transformator. Sehingga bentuk kurva yang terjadi hanya menyerupai garis linier. Besar nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet pada ketiga lokasi monitor juga memiliki nilai yang relatif sama.

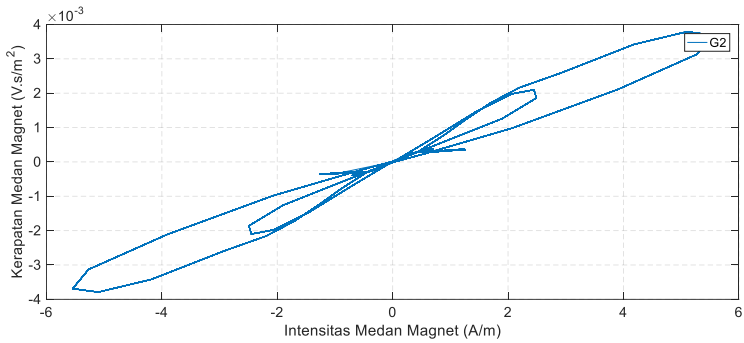
Tabel 4.20 Nilai B-H di titik F transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
F ₁	1,143	0,506	1.192,716	514,928
F ₂	1,136	0,508	1.182,197	515,542
F ₃	1,140	0,508	1.188,875	516,953

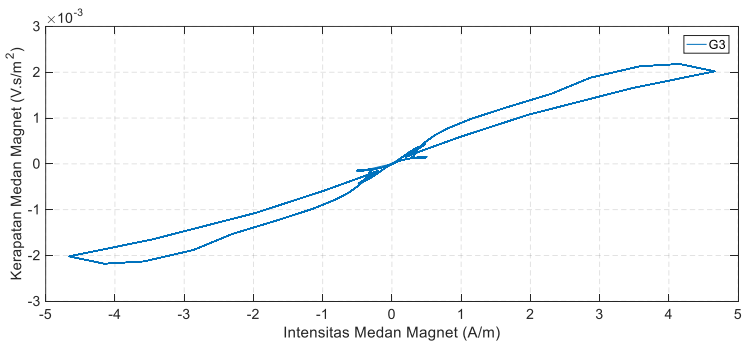
4.2.2.7 Titik G



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.28 Kurva histeresis di titik G_1 (a); G_2 (b); dan G_3 (c) transformator laminasi 2,5 cm

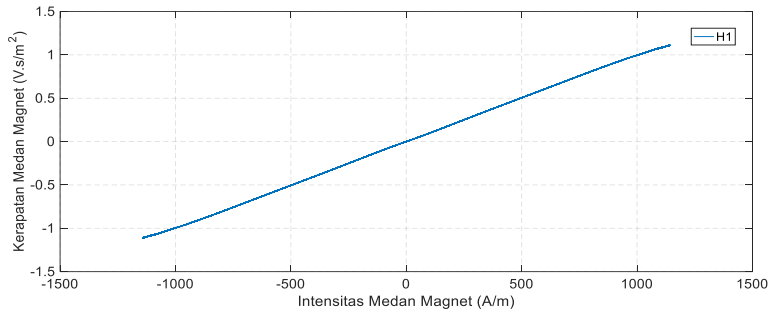
Pada titik G_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $0,008 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,008 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,002 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $16,429 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-16,429 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $2,781 \text{ A/m}$. G_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,004 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,004 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,001 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $5,546 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-5,546 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $1,496 \text{ A/m}$. G_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,002 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,002 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,000904 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $4,662 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-4,662 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $0,844 \text{ A/m}$.

Apabila dilihat dari letak koordinat monitor pada transformator, titik G berada di kaki tengah transformator, sehingga banyak aliran distribusi fluks seperti yang dijelaskan pada sub-bab sebelumnya. Nilai intensitas medan magnet dan kerapatan medan magnet terbesar berada pada titik G_3 . Hal ini dapat terjadi karena pada beberapa sudut fasa, aliran distribusi fluks menjauhi kaki tengah.

Tabel 4.21 Nilai B-H di titik G transformator laminasi 2,5 cm

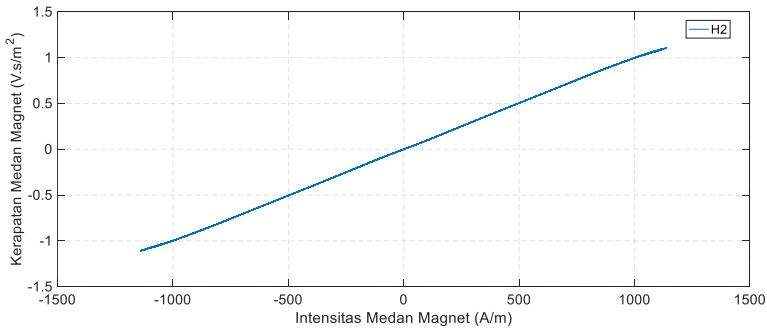
Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
G_1	0,008	0,002	16,429	2,781
G_2	0,004	0,001	5,546	1,496
G_3	0,002	0,000	4,662	0,844

4.2.2.8 Titik H

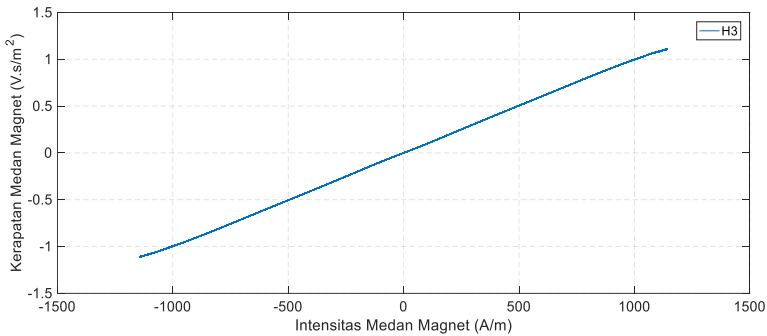


(a)

Gambar 4.29 Kurva histeresis di titik H_1 (a); H_2 (b); dan H_3 (c) transformator laminasi 2,5 cm



(b)



(c)

Gambar 4.29 Kurva histerisis di titik H_1 (a); H_2 (b); dan H_3 (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

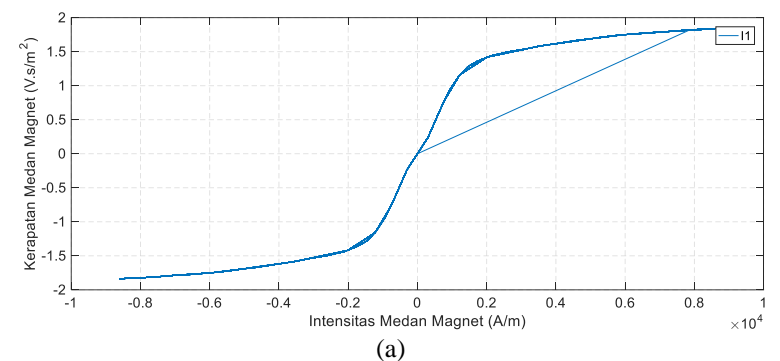
Pada titik H_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $1,109 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,109 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,487 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.142,002 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.142,002 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $492,383 \text{ A/m}$. H_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $1,107 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,107 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,486 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.138,753 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.138,753 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $491,028 \text{ A/m}$. H_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $1,109 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,109 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,487 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $1.141,591 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-1.141,591 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $492,276 \text{ A/m}$.

Selain titik F dan G, titik H juga berada di kaki tengah transformator. Dapat dianalisis bahwa titik H dan titik F memiliki kesamaan karakteristik karena koordinatnya berada di kaki tengah transformator yang juga sebagai daerah yang dilewati bersama oleh aliran distribusi fluks dari kaki kanan dan kiri transformator. Besar kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnetnya pun nyaris identik, yaitu $1,1 \text{ V.s/m}^2$ dan 1.140 A/m dengan selisih 1%.

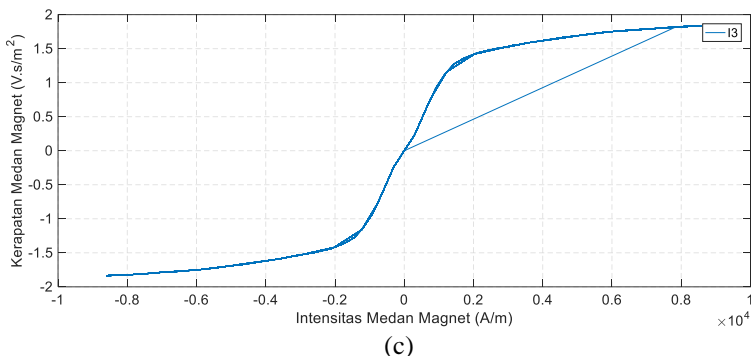
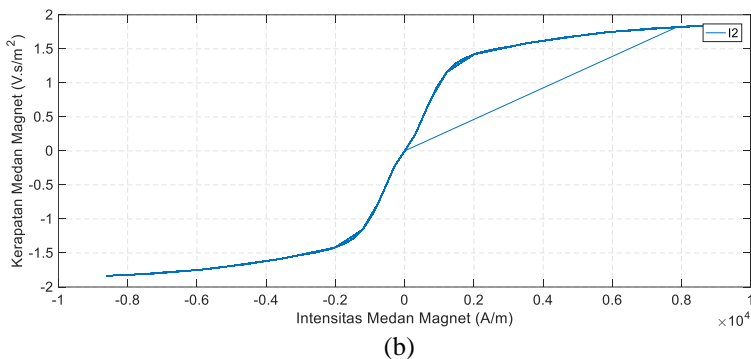
Tabel 4.22 Nilai B-H di titik H transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
H ₁	1,109	0,487	1.142,002	492,383
H ₂	1,107	0,486	1.138,753	491,028
H ₃	1,109	0,487	1.141,591	492,276

4.2.2.9 Titik I



Gambar 4.30 Kurva histerisis di titik I₁ (a); I₂ (b); dan I₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



Gambar 4.30 Kurva histerisis di titik I_1 (a); I_2 (b); dan I_3 (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

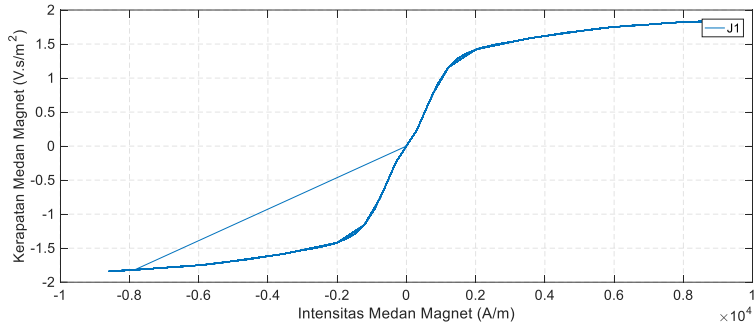
Pada titik I_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $1,837 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,837 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $1,564 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $8.596,848 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-8.596,848 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $5.083,175 \text{ A/m}$. I_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $1,837 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,837 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $1,564 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $8.599,566 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-8.599,566 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $5.081,821 \text{ A/m}$. I_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $1,836 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,836 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $1,564 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $8.581,941 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-8.581,941 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $5.074,967 \text{ A/m}$.

Ketiga lokasi monitor memiliki keseimbangan besar kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet. Titik I₂ memiliki besar B dan H lebih tinggi daripada kedua titik lainnya, yaitu sebesar 1,8369 V.s/m² dan 8.599,56 A/m.

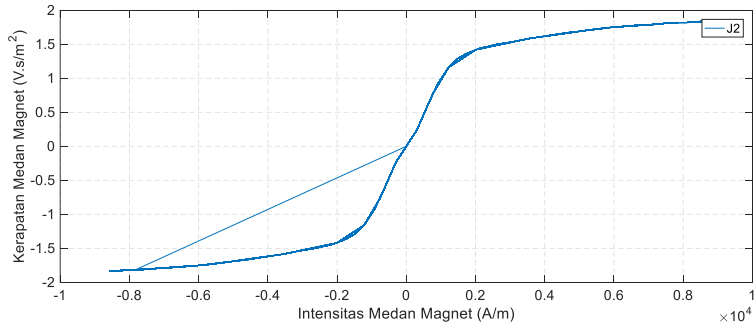
Tabel 4.23 Nilai B-H di titik I transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
I ₁	1,837	1,564	8.596,848	5.083,175
I ₂	1,837	1,564	8.599,566	5.081,821
I ₃	1,836	1,564	8.581,941	5.074,967

4.2.2.10 Titik J

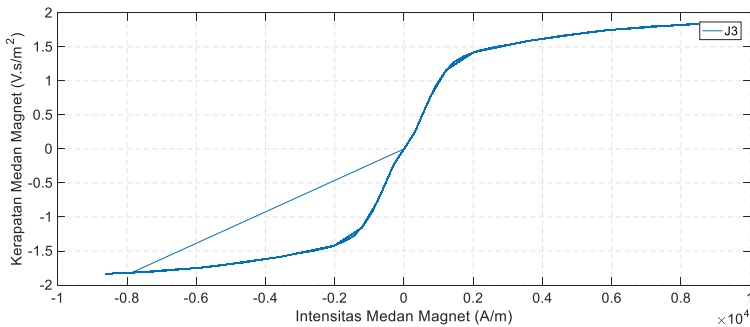


(a)



(b)

Gambar 4.31 Kurva histerisis di titik J₁ (a); J₂ (b); dan J₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



(c)

Gambar 4.31 Kurva histerisis di titik J₁ (a); J₂ (b); dan J₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

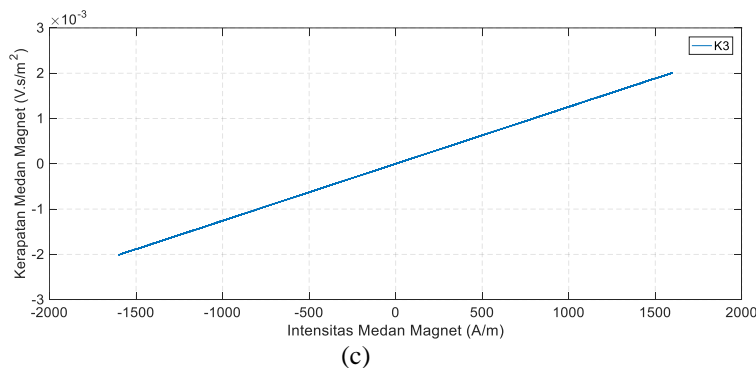
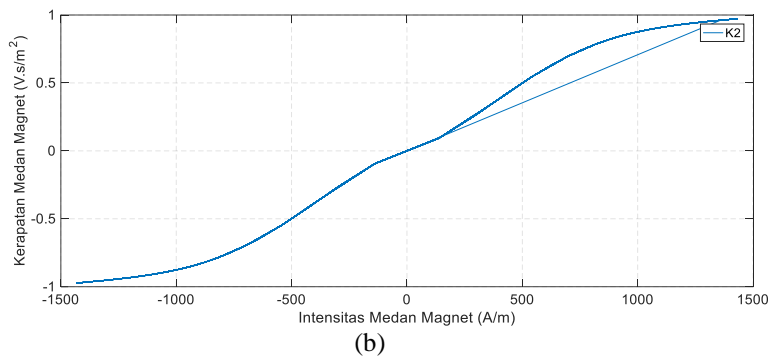
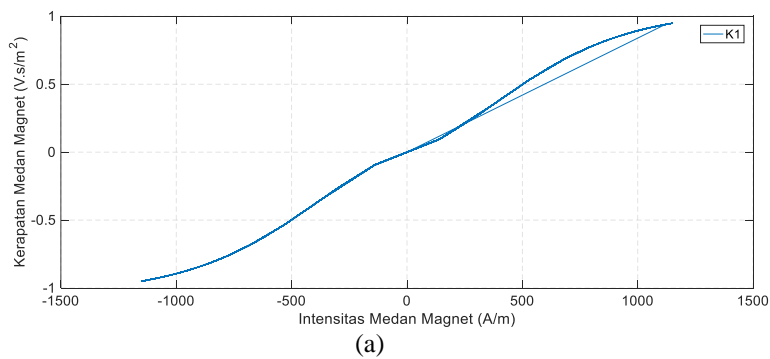
Pada titik J₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,837 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,837 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,563 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.588,248 A/m, nilai B_{min} sebesar -8.588,247 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.078,076 A/m. J₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,836 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,836 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,564 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.575,871 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.575,871 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.063,557 A/m. J₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,837 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,837 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,564 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.603,568 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.603,568 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.087,133 A/m.

Selain titik I, titik J juga memiliki kesamaan pola kurva histerisis pada masing-masing lokasi monitor. Besar kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet tertinggi berada di titik J₃, yaitu sumbu koordinat z=10 dengan nilai 1,837 V.s/m² dan 8.603,56 A/m.

Tabel 4.24 Nilai B-H di titik J transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
J ₁	1,837	1,563	8.588,248	5.078,076
J ₂	1,836	1,564	8.575,871	5.073,557
J ₃	1,837	1,564	8.603,568	5.087,133

4.2.2.11 Titik K



Gambar 4.32 Bentuk kurva histeresis di titik K₁ (a); K₂ (b); dan K₃ transformator laminasi 2,5 cm

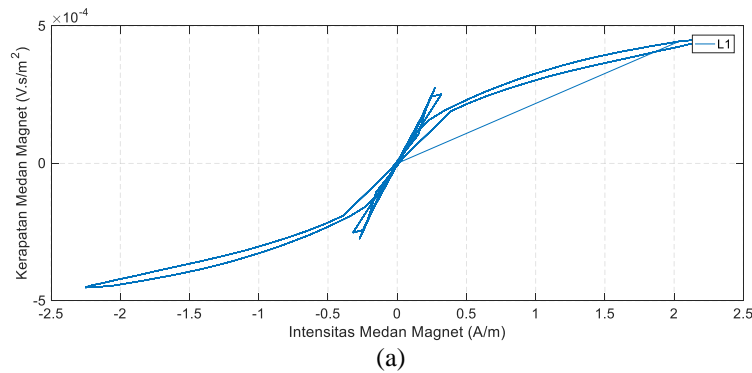
Pada titik K₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,949 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,949 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,800 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.147,276 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.147,276 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 902,243 A/m. K₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,972 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,972 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,819 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.431,865 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.431,865 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.034,373 A/m. K₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,002 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,002 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.5943 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.5943 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.087,858 A/m.

Pada titik monitor K, terdapat sedikit perbedaan antara K₁ dengan K₂, yaitu pada nilai intensitas medan magnet, dimana K₂ memiliki nilai lebih besar, yaitu 1.431,86 A/m.

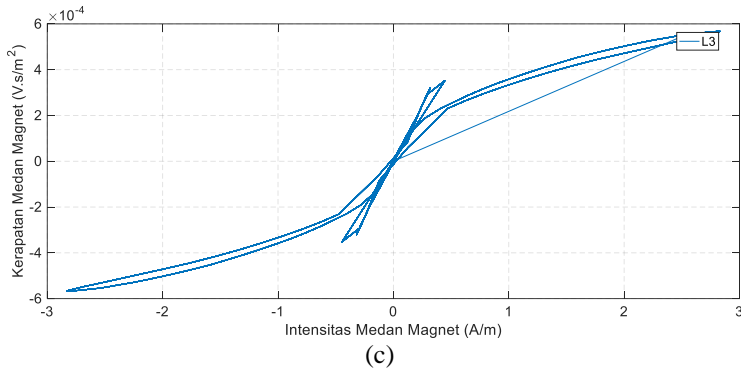
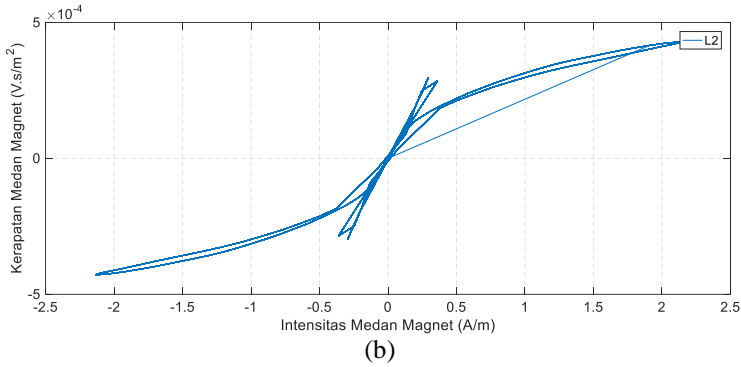
Tabel 4.25 Nilai B-H di titik K transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
K ₁	0,949	0,800	1.147,276	902,243
K ₂	0,972	0,819	1.431,865	1.034,373
K ₃	0,002	0,001	1.598,350	1.087,858

4.2.2.12 Titik L



Gambar 4.33 Kurva histerisis di titik L₁ (a); L₂ (b); dan L₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



Gambar 4.33 Kurva histerisis di titik L₁ (a); L₂ (b); dan L₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

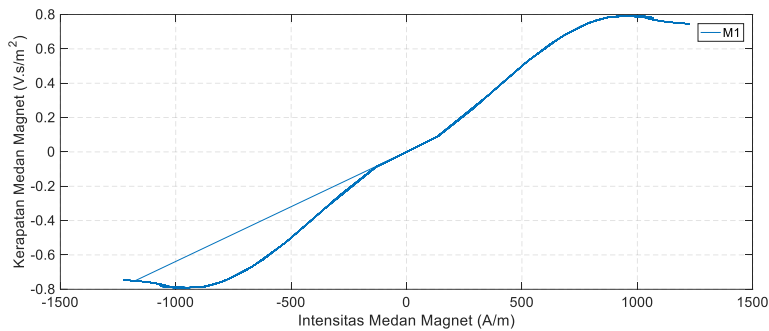
Pada titik L₁ nilai B_{\max} adalah sebesar 0,000452 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,000452 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000311 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 2,251 A/m, nilai H_{\min} sebesar -2,251 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,121 A/m. L₂ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,000428 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,000428 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000296 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 2,133 A/m, nilai H_{\min} sebesar -2,133 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,0604 A/m. L₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,000568 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,000568 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000382 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 2,829746 A/m, nilai H_{\min} sebesar -2,829746 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,38779 A/m.

Bentuk ketiga kurva histerisis di titik L memiliki kesamaan. Namun, apabila ditinjau berdasarkan skala sumbu x dan sumbu y kurva, didapatkan titik L_3 memiliki besar kerapatan medan magnet yang lebih tinggi dibanding kedua titik lainnya, yaitu $0,000568 \text{ V.s/m}^2$.

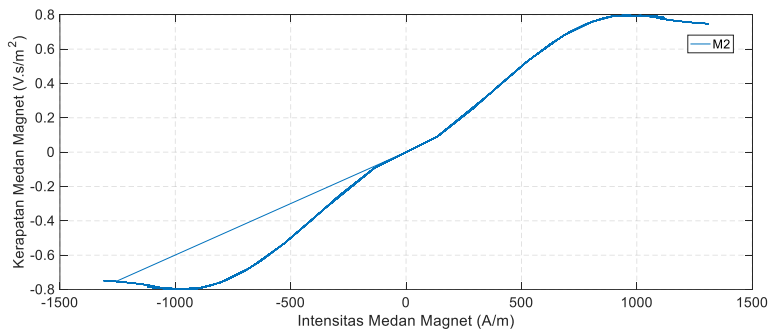
Tabel 4.26 Nilai B-H di titik L transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
L ₁	0,000	0,000	2,251	1,121
L ₂	0,000	0,000	2,133	1,060
L ₃	0,001	0,000	2,830	1,388

4.2.2.13 Titik M

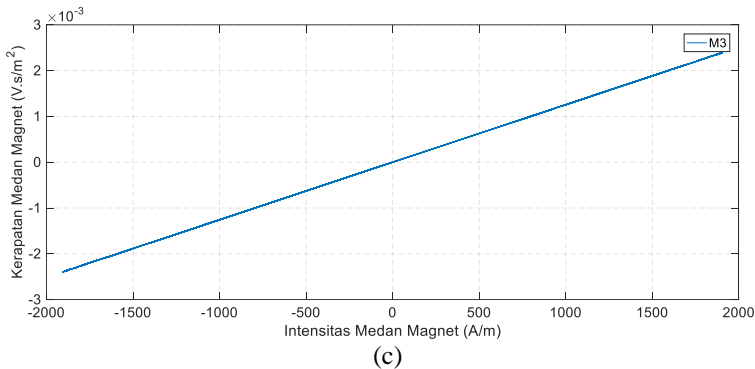


(a)



(b)

Gambar 4.34 Kurva histerisis di titik M₁ (a); M₂ (b); dan M₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm



Gambar 4.34 Kurva histerisis di titik M₁ (a); M₂ (b); dan M₃ (c) transformator laminasi 2,5 cm (lanjutan)

Pada titik M₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,791 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,791 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,695 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.224,339 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.224,339 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 945,063 A/m. M₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,796 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,796 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,699 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.308,752 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.308,752 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 992,050 A/m. M₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,002 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,002 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,002V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.905,199 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.905,199 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.309,350 A/m. Kurva histerisis di titik M₁ dan M₂ hampir memiliki bentuk yang sama. Namun, M₂ memiliki nilai B-H yang lebih tinggi. Sedangkan untuk kurva histerisis di titik M₃, nilai intensitas medan magnetnya jauh lebih besar daripada nilai kerapatan medan magnetnya yang menyebabkan bentuk kurva histerisisnya menyerupai garis linier. Tabel 4.27 menunjukkan ringkasan nilai B-H di titik M, dan Tabel 4.28 menunjukkan ringkasan keseluruhan.

Tabel 4.27 Nilai B-H di titik M transformator laminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
M ₁	0,791	0,695	1.224,339	945,063
M ₂	0,796	0,699	1.308,752	992,050
M ₃	0,002	0,002	1.905,199	1.309,350

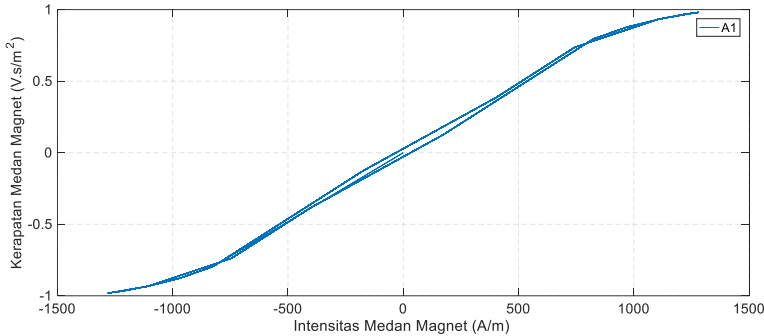
Tabel 4.28 Ringkasan nilai B-H pada transformator berlaminasi 2,5 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
A ₁	0,964	0,807	1.198,988	925,077
A ₂	0,972	0,819	1.432,287	1.034,978
A ₃	1,012	0,846	1.409,409	1.034,756
B ₁	0,001	0,000	2,683	1,310
B ₂	0,000	0,000	2,458	1,204
B ₃	0,001	0,000	2,969	1,440
C ₁	0,980	0,838	1.586,526	1.150,202
C ₂	1,014	0,858	1.561,221	1.134,377
C ₃	0,814	0,710	1.289,556	980,225
D ₁	1,838	1,559	8.630,251	5.079,608
D ₂	1,837	1,559	8.618,456	5.071,906
D ₃	0,011	0,007	8.801,502	5.200,755
E ₁	1,838	1,559	8.624,051	5.076,145
E ₂	1,837	1,559	8.618,996	5.074,241
E ₃	0,011	0,007	8.854,797	5.251,631
F ₁	1,143	0,506	1.192,716	514,928
F ₂	1,136	0,508	1.182,197	515,542
F ₃	1,140	0,508	1.188,875	516,953
G ₁	0,008	0,002	16,429	2,781
G ₂	0,004	0,001	5,546	1,496
G ₃	0,002	0,000	4,662	0,844
H ₁	1,109	0,487	1.142,002	492,383
H ₂	1,107	0,486	1.138,753	491,028
H ₃	1,109	0,487	1.141,591	492,276
I ₁	1,837	1,564	8.596,848	5.083,175
I ₂	1,837	1,564	8.599,566	5.081,821
I ₃	1,836	1,564	8.581,941	5.074,967
J ₁	1,837	1,563	8.588,248	5.078,076
J ₂	1,836	1,564	8.575,871	5.073,557
J ₃	1,837	1,564	8.603,568	5.087,133
K ₁	0,949	0,800	1.147,276	902,243
K ₂	0,972	0,819	1.431,865	1.034,373
K ₃	0,002	0,001	1.598,350	1.087,858
L ₁	0,000	0,000	2,251	1,121
L ₂	0,000	0,000	2,133	1,060
L ₃	0,001	0,000	2,830	1,388
M ₁	0,791	0,695	1.224,339	945,063
M ₂	0,796	0,699	1.308,752	992,050
M ₃	0,002	0,002	1.905,199	1.309,350

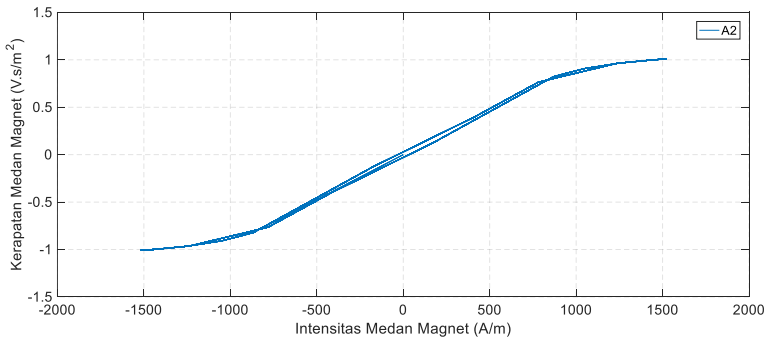
Pada transformator dengan laminasi 2,5 cm, nilai kerapatan medan magnet terbesar B_{\max} berada pada titik E_1 atau koordinat $x= 7$; $y= 20$; $z= 0$, sebesar $1,838 \text{ V.s/m}^2$. Kemudian rerata absolut B_{avg} berada pada titik I_1 , I_2 , I_3 , J_2 , dan J_3 yakni sebesar $1,564 \text{ V.s/m}^2$. Sedangkan untuk nilai intensitas medan magnet terbesar sekaligus rerata absolutnya berada pada titik E_3 , yaitu masing-masing sebesar $8.854,797 \text{ A/m}$ serta $5.251,631 \text{ A/m}$.

4.2.3 Kurva Histerisis pada Inti Transformator dengan Laminasi 0,03 cm

4.2.3.1 Titik A

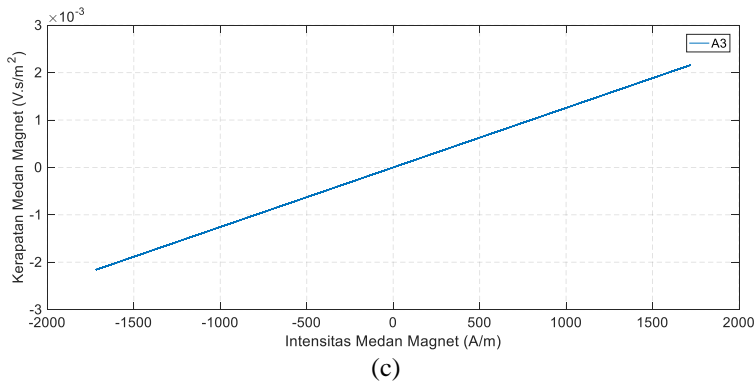


(a)



(b)

Gambar 4.35 Kurva histerisis pada titik A_1 (a); A_2 (b); A_3 (c) transformator laminasi 0,03 cm



Gambar 4.35 Kurva histeresis pada titik A₁ (a); A₂ (b); A₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

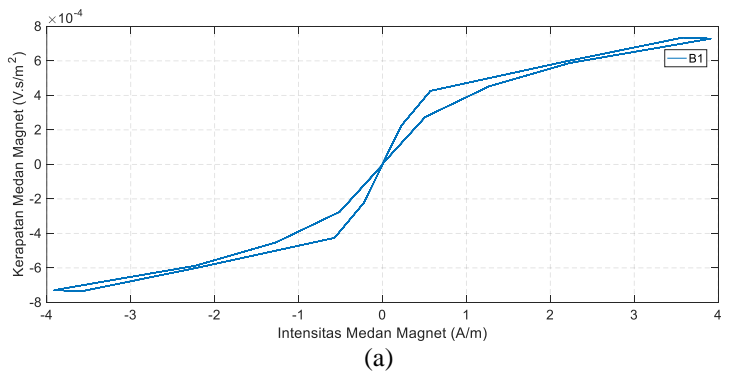
Pada titik A₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,981 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,981 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,771 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.279,411 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.279,411 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 906,514 A/m. A₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,010 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,010 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,796 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.518,973 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.518,973 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.015,774 A/m. A₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,002 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,002 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.717,311 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.717,311 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.157,648 A/m.

Dari hasil simulasi, dapat terlihat bahwa pada titik A₃ memiliki kurva histeresis yang bentuknya cenderung menyerupai garis lurus atau linier. Hal ini disebabkan kerapatan medan magnet pada titik tersebut sangat kecil, namun intensitas medan magnetnya bernilai paling besar.

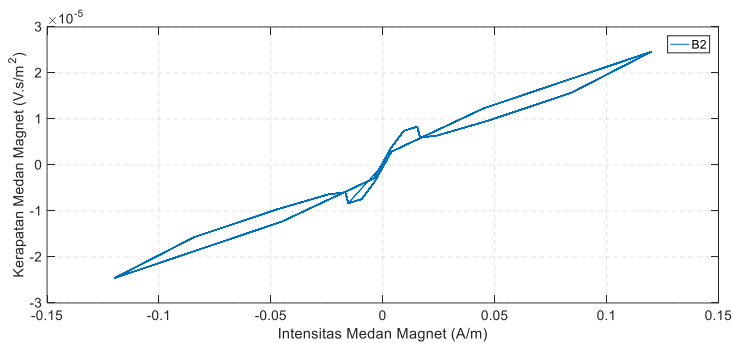
Tabel 4.29 Nilai B-H di titik A transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
A ₁	0,981	0,771	1.279,411	906,514
A ₂	1,010	0,796	1.518,973	1.015,774
A ₃	0,002	0,001	1.717,311	1.157,648

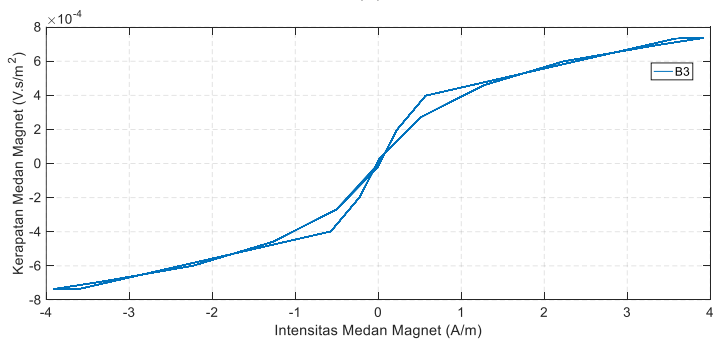
4.2.3.2 Titik B



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.36 Kurva histeresis di titik B1 (a); B2 (b); dan B3 transformator laminasi 0,03 cm

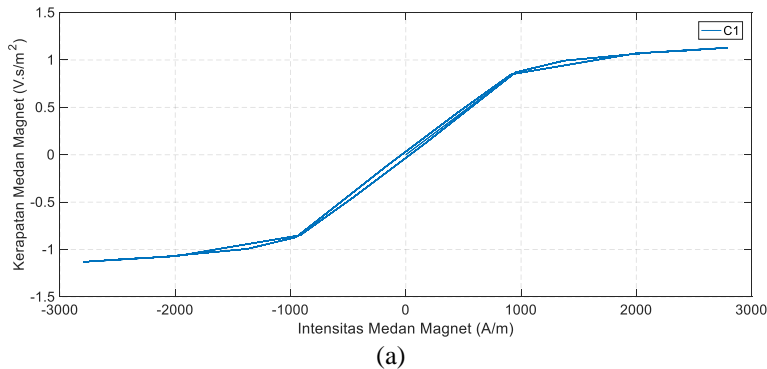
Pada titik B₁ nilai B_{max} adalah sebesar 0,001 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,001 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000471V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 3,91043 A/m, nilai H_{min} sebesar -3,91043 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,780 A/m. B₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,0000246 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,0000246 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,00000969 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 0,119906 A/m, nilai H_{min} sebesar -0,119906 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 0,036942 A/m. B₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,000736 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,000736 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000468 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 3,910 A/m, nilai B_{min} sebesar -3,910 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,780 A/m.

Dari ketiga kurva tersebut, dapat dianalisis bahwa titik B₃ dengan koordinat sumbu z=10 memiliki nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet terbesar. Dan pada titik B₂ nilai B-H nya sangat kecil dibandingkan titik B₁ dan B₂.

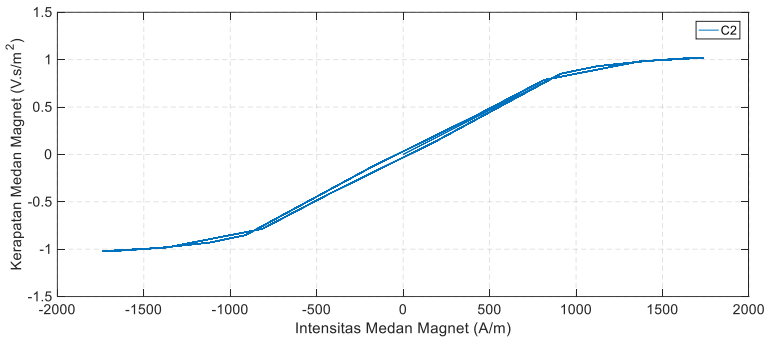
Tabel 4.30 Nilai B-H di titik B transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
B ₁	0,001	0,000	3,910	1,780
B ₂	0,000	0,000	0,120	0,037
B ₃	0,001	0,000	3,910	1,780

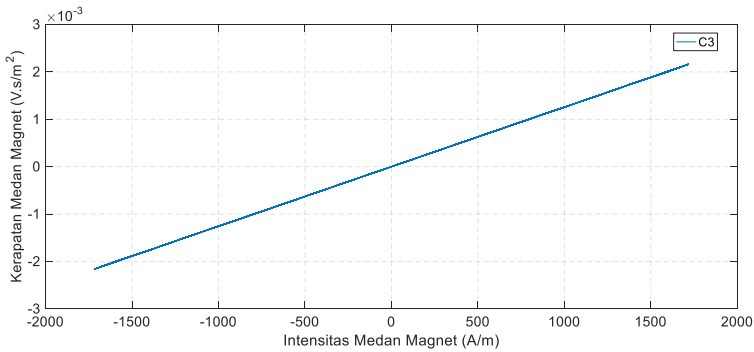
4.2.3.3 Titik C



Gambar 4.37 Kurva histeresis pada titik C₁ (a); C₂ (b); C₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm



(b)



(c)

Gambar 4.37 Kurva histerisis pada titik C₁ (a); C₂ (b); C₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

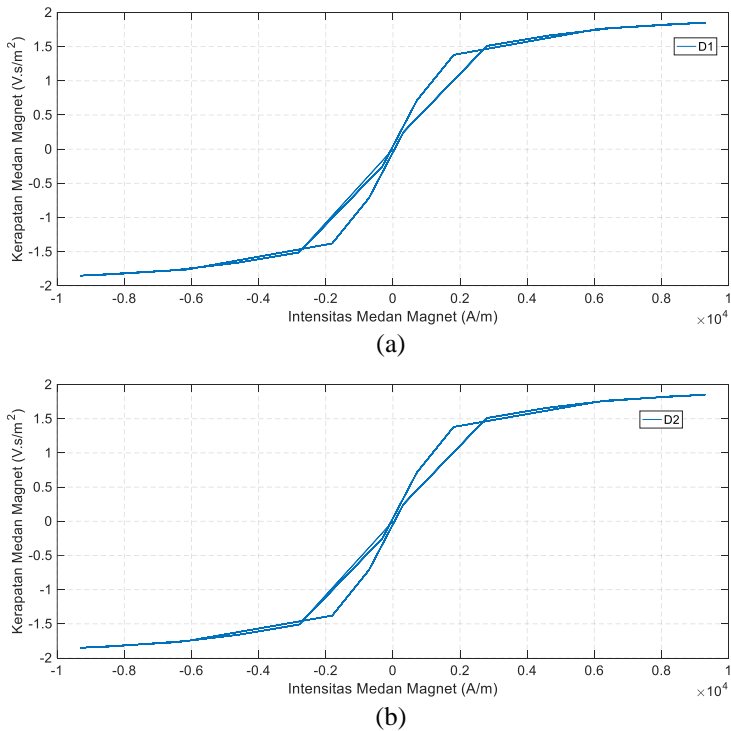
Pada titik C₁ nilai B_{\max} adalah sebesar 1,133 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,133 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,879 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 2.790,235 A/m, nilai H_{\min} sebesar -2.790,235 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.589,130 A/m. C₂ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 1,022 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,022 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,813 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 1.734,674 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.734,674 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.118,112 A/m. C₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,002 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,002 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 1.716,698 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.716,698 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.164,968 A/m.

Dari ketiga titik tersebut, titik C_1 memiliki kerapatan medan magnet dan titik saturasi yang lebih tinggi. Nilai intensitas medan magnet maksimal juga terjadi pada titik tersebut. Hal yang timpang terjadi di titik C_3 dimana nilai kerapatan medan magnetnya sangat rendah.

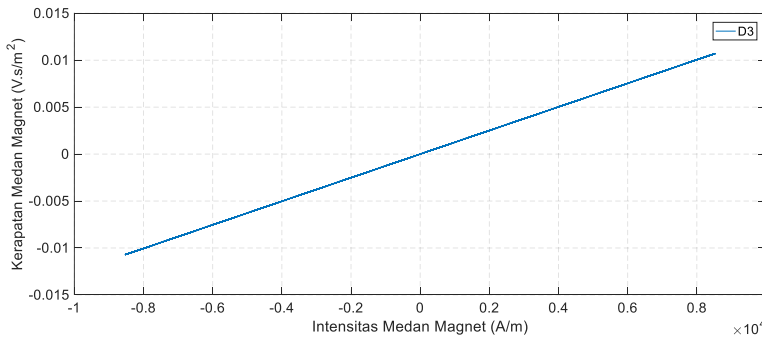
Tabel 4.31 Nilai B-H di titik C transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
C_1	1,133	0,879	2.790,235	1.589,130
C_2	1,022	0,813	1.734,674	1.118,112
C_3	0,002	0,001	1.716,698	1.164,968

4.2.3.4 Titik D



Gambar 4.38 Kurva histerisis pada titik D_1 (a); D_2 (b); dan D_3 (c) transformator laminasi 0,03 cm



(c)

Gambar 4.38 Kurva histeresis pada titik D₁ (a); D₂ (b); dan D₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

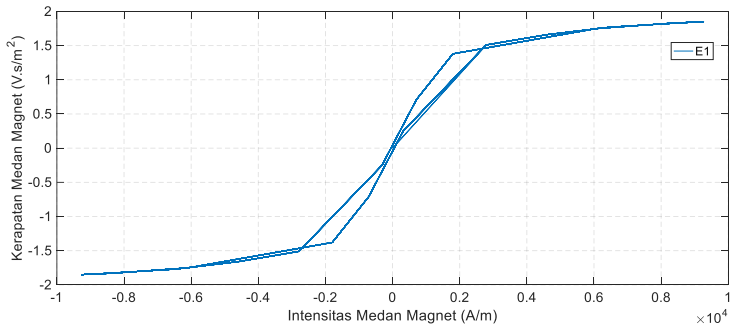
Pada titik D₁ nilai B_{\max} adalah sebesar 1,855 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,855 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,457 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 9.305,151 A/m, nilai H_{\min} sebesar -9.305,151 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 4.902,851 A/m. D₂ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 1,854 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,854 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,457 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 9.290,094 A/m, nilai H_{\min} sebesar -9.290,094 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 4.893,539 A/m. D₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,011 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,0011 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,007 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 8.524,028 A/m, nilai H_{\min} sebesar -8.524,028 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.184,496 A/m.

D₁ dan D₂ memiliki kemiripan bentuk. Hal ini dikarenakan nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnetnya tipikal. Sedangkan untuk titik D₃ nilai kerapatan medan magnetnya sangat kecil, 0,011 V.s/m² dengan nilai intensitas medan magnet maksimal yaitu 8.524,028 A/m sehingga bentuk kurva histeresisnya mendekati bentuk garis linier.

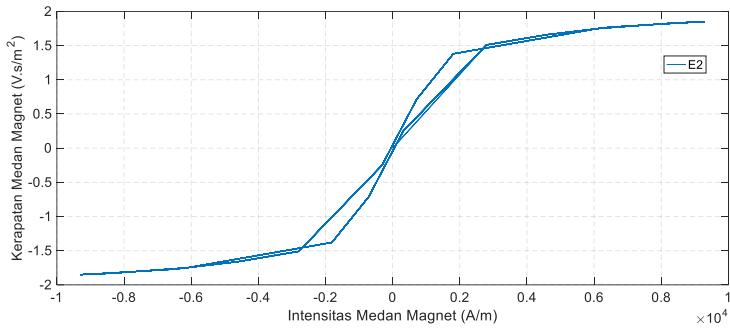
Table 4.32 Nilai B-H di titik D transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
D ₁	1,855	1,457	9.305,151	4.902,851
D ₂	1,854	1,457	9.290,094	4.893,539
D ₃	0,011	0,007	8.524,028	5.184,496

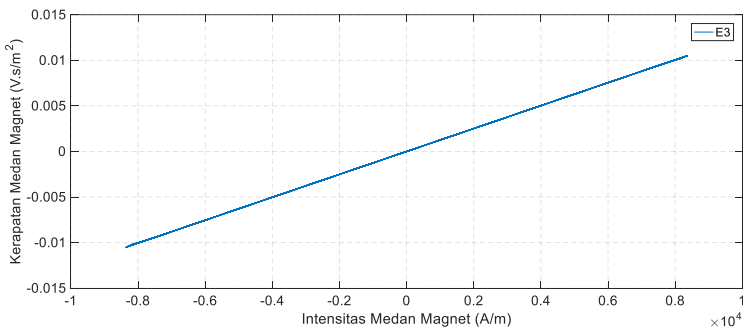
4.2.3.5 Titik E



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.39 Kurva histeresis di titik E₁ (a); E₂ (b); E₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm

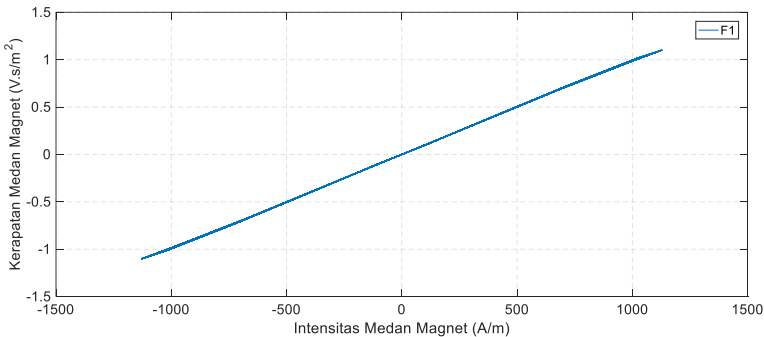
Pada titik E₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,854 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,854 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,456 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 9.264,081 A/m, nilai H_{min} sebesar -9.264,081 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 4.879,309 A/m. E₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,854 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,854 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,457 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 9.285,117 A/m, nilai H_{min} sebesar -9.285,117 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 4.892,960 A/m. E₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,010 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,010 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,006 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.351,012 A/m, nilai H_{min} sebesar -8.351,012 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.056,856 A/m.

Terdapat ketimpangan di titik E₃ dimana titik tersebut memiliki kerapatan medan magnet paling timpang daripada kedua titik lainnya. Namun, besar intensitas medan magnetnya masih terbilang besar, sehingga bentuk kurva histeresisnya berbentuk linier.

Tabel 4.33 Nilai B-H di titik E transformator laminasi 0,03 cm

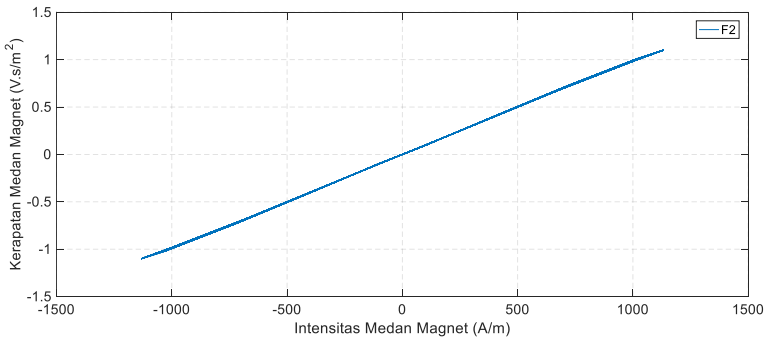
Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
E ₁	1,854	1,456	9.264,081	4.879,309
E ₂	1,854	1,457	9.285,117	4.892,960
E ₃	0,010	0,006	8.351,012	5.056,856

4.2.3.6 Titik F

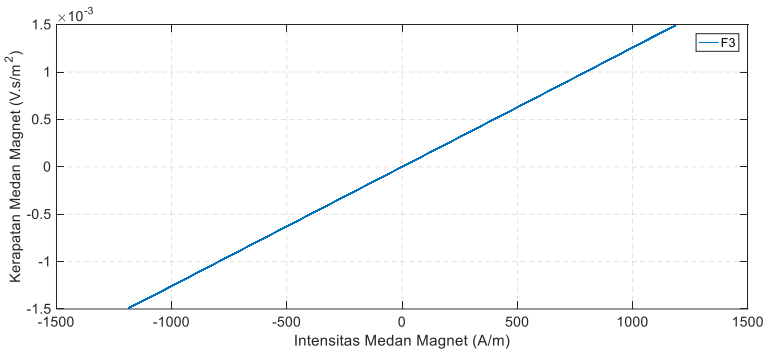


(a)

Gambar 4.40 Kurva histeresis di titik F₁ (a); F₂ (b); F₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm



(b)



(c)

Gambar 4.40 Kurva histerisis di titik F_1 (a); F_2 (b); F_3 (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

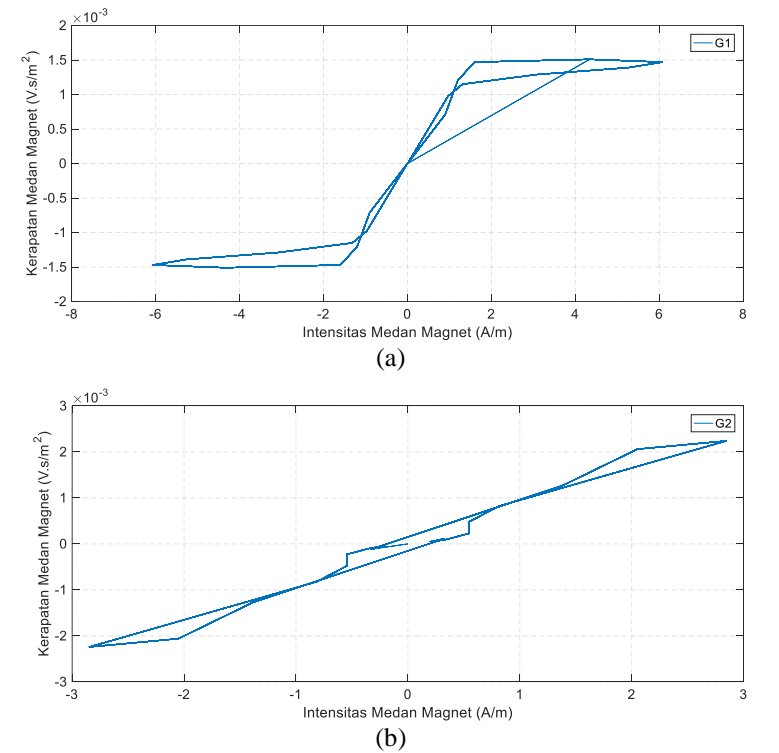
Pada titik F_1 nilai B_{\max} adalah sebesar 1,097 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,097 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,540 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 1.127,438 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.127,438 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 543,931 A/m. F_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 1,100 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,100 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,541 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 1.131,549 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.131,549 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 546,370 A/m. F_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,001 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,001 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,01 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 1.186,226 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.186,226 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 581,096 A/m.

Berdasarkan hasil simulasi, pada titik F belum terlihat titik saturasi maupun *knee-point*, atau pada titik tersebut masih berada dalam daerah kerja transformator. Sehingga bentuk kurva yang terjadi hanya menyerupai garis linier, dengan F_2 memiliki nilai B-H tertinggi.

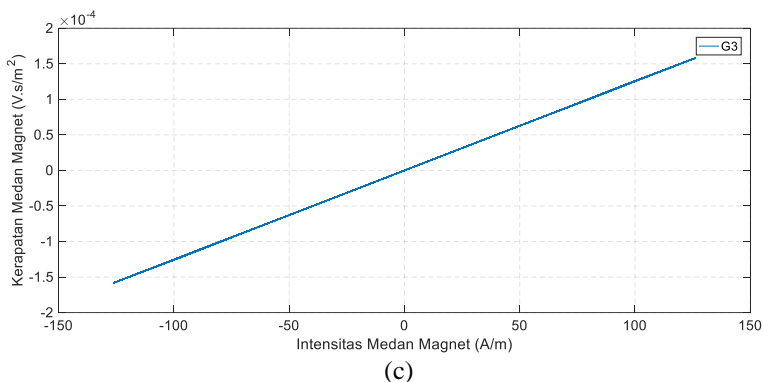
Tabel 4.34 Nilai B-H di titik F transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
F ₁	1,097	0,540	1.127,438	543,931
F ₂	1,100	0,541	1.131,549	546,370
F ₃	0,001	0,001	1.186,226	581,096

4.2.3.7 Titik G



Gambar 4.41 Kurva histeresis di titik G₁ (a); G₂ (b); dan G₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm



Gambar 4.41 Kurva histerisis di titik G_1 (a); G_2 (b); dan G_3 (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

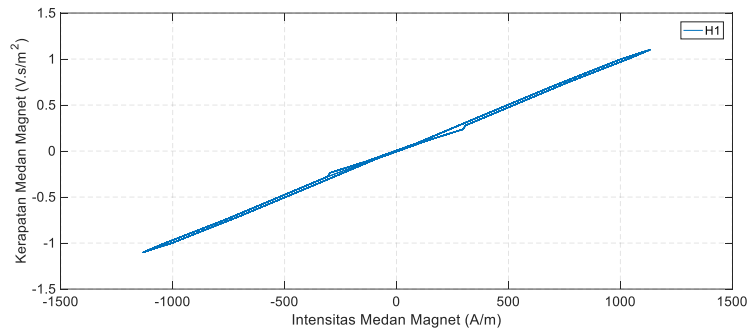
Pada titik G_1 nilai B_{\max} adalah sebesar 0,002 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,002 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 6,071 A/m, nilai H_{\min} sebesar -6,071 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 2,481 A/m. G_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,002 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,002 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 2,846 A/m, nilai H_{\min} sebesar -2,846 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,128 A/m. G_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,000024 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,000024 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,000014 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 126,103 A/m, nilai H_{\min} sebesar -126,103 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 82,415 A/m.

Titik G berada di kaki tengah transformator. Dari hasil simulasi terlihat bahwa bentuk kurva histerisisnya tidak beraturan. Nilai intensitas medan magnet dan kerapatan medan magnet terbesar berada pada titik G_3 . Dapat dianalisis, nilai B dan H kecil adalah terdapat kelipatan fasa dimana arah aliran distribusi fluks menjauhi kaki tengah transformator.

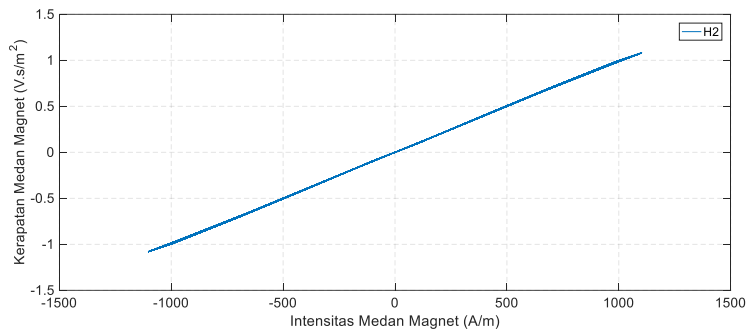
Tabel 4.35 Nilai B-H di titik G transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
G_1	0,002	0,001	6,071	2,481
G_2	0,002	0,001	2,846	1,128
G_3	0,000	0,000	126,103	82,415

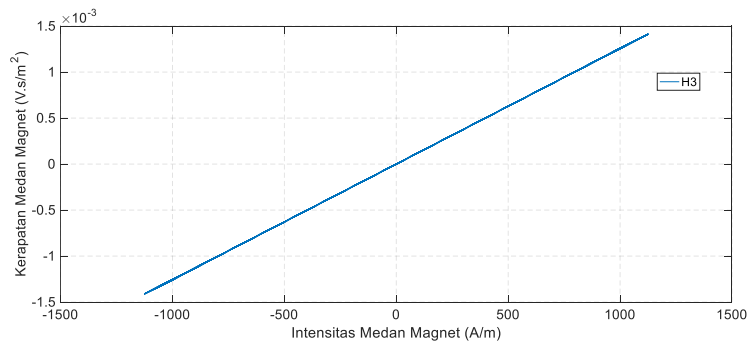
4.2.3.8 Titik H



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.42 Kurva histeresis di titik H₁ (a); H₂ (b); H₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm

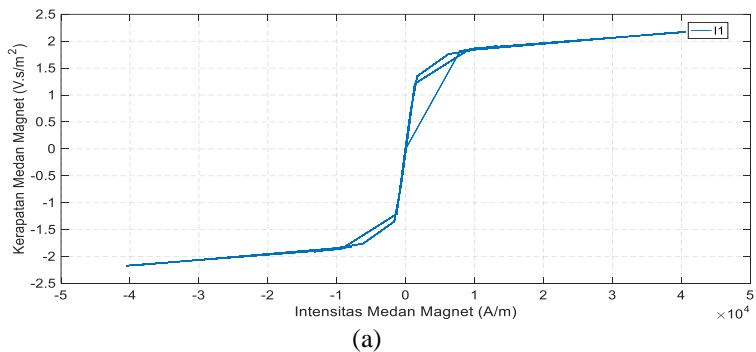
Pada titik H₁ nilai B_{max} adalah sebesar 1,100 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,100 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,563 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.131,632 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.131,632 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 582,399 A/m. H₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 1,078 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -1,078 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,528 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.101,659 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.101,659 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 531,374 A/m. H₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,001 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,001 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 1.124,949 A/m, nilai H_{min} sebesar -1.124,949 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 543,417 A/m.

Dapat dianalisis bahwa titik H dan titik F memiliki kesamaan karakteristik karena koordinatnya berada di kaki tengah transformator sebagai daerah yang dilewati bersama oleh aliran distribusi fluks dari kaki kanan dan kiri transformator. Besar kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnetnya pun identik, kecuali titik H₃. Titik H dan F memiliki kurva histerisis yang titik saturasinya belum terlihat.

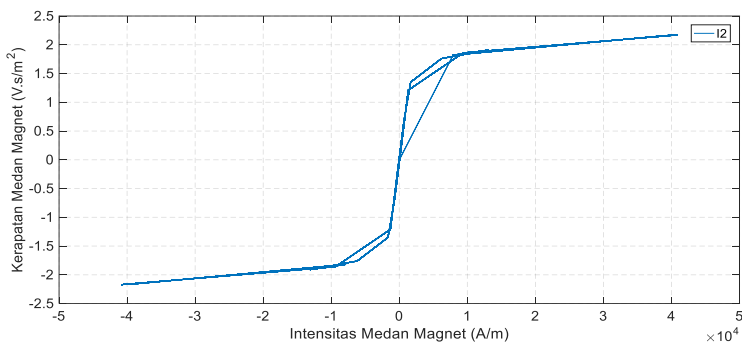
Tabel 4.36 Nilai B-H di titik H transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
H ₁	1,100	0,563	1.131,632	582,399
H ₂	1,078	0,528	1.101,659	531,374
H ₃	0,001	0,001	1.124,949	543,417

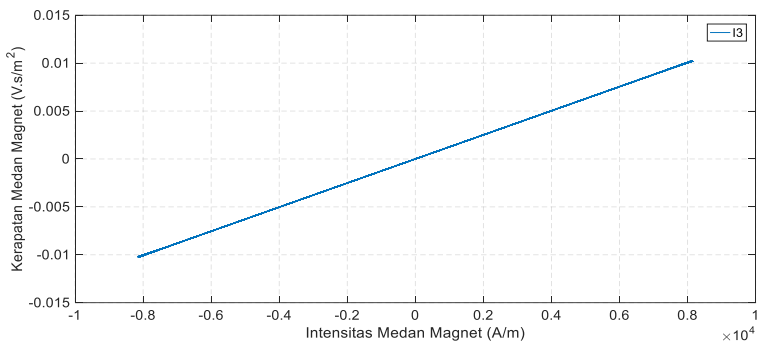
4.2.3.9 Titik I



Gambar 4.43 Kurva histerisis di titik I₁ (a); I₂ (b); dan I₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm



(b)



(c)

Gambar 4.43 Kurva histerisis di titik I_1 (a); I_2 (b); dan I_3 (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

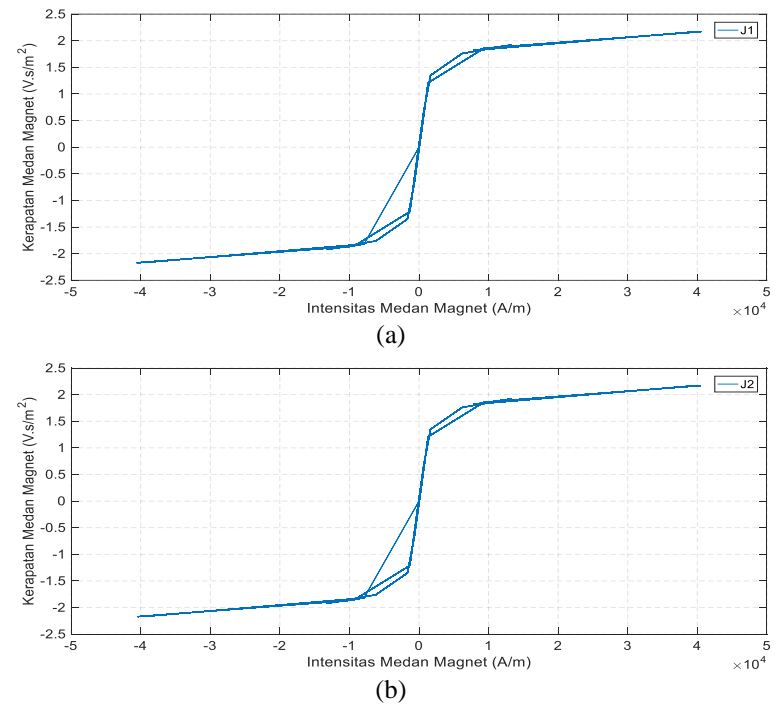
Pada titik I_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $2,172 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-2,172 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $1,516 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $40.524,028 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-40.524,028 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $11.989,474 \text{ A/m}$. I_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $2,174 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-2,174 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $1,516 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $40.821,324 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-40.821,324 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $12.045,989 \text{ A/m}$. I_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,010 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,010 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,006 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $8.150,746 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-8.150,746 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $5.138,709 \text{ A/m}$.

Pada simulasi titik I, nilai kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet terbesar berada pada I₂. Kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet pada sumbu z=0 dan z=5 memiliki nilai yang hampir sama. Hal ini dapat diartikan bahwa kerapatan medan magnet terbesar di titik I cenderung mendekati permukaan sumbu z=0.

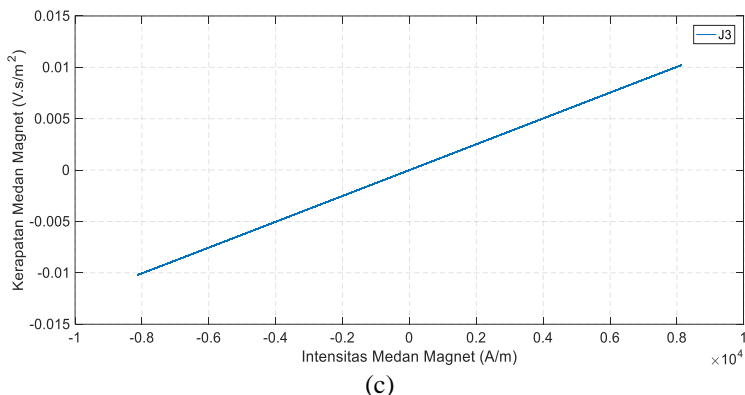
Tabel 4.37 Nilai B-H di titik I transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
I ₁	2,172	1,516	40.524,028	11.989,474
I ₂	2,174	1,516	40.821,324	12.045,989
I ₃	0,010	0,006	8.150,746	5.138,709

4.2.3.10 Titik J



Gambar 4.44 Kurva histeresis pada titik J₁ (a); J₂ (b); dan J₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm



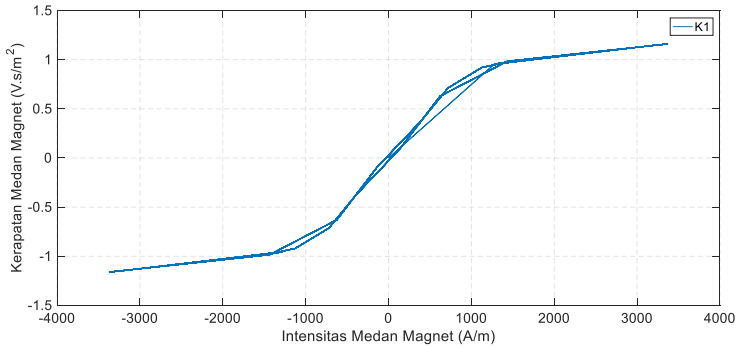
Gambar 4.44 Kurva histeresis pada titik J₁ (a); J₂ (b); dan J₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

Pada titik J₁ nilai B_{max} adalah sebesar 2,172 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -2,172 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,516 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 40.512,178 A/m, nilai B_{min} sebesar -40.512,178 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 11.987,732 A/m. J₂ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 2,171 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -2,171 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 1,517 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 40.512,178 A/m, nilai H_{min} sebesar -40.432,021 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 11.980,334 A/m. J₃ memiliki nilai B_{max} adalah sebesar 0,010 V.s/m² dan nilai B_{min} sebesar -0,010 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,006 V.s/m². Nilai H_{max} adalah sebesar 8.128,97 A/m, nilai B_{min} sebesar -8.128,97 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 5.125,339 A/m.

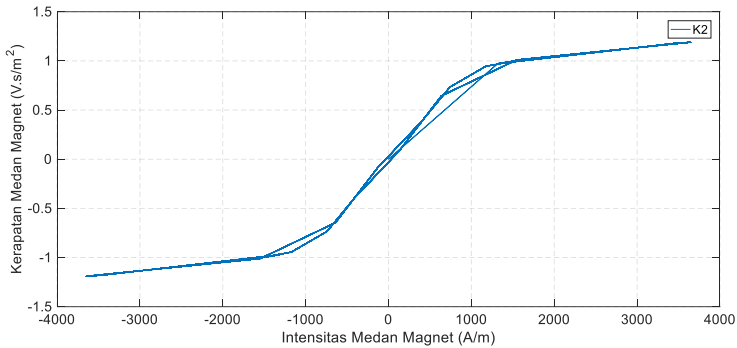
Tabel 4.38 Nilai B-H di titik J transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
J ₁	2,172	1,516	40.512,178	11.987,732
J ₂	2,171	1,517	40.423,021	11.980,334
J ₃	0,010	0,006	8.128,970	5.125,339

4.2.3.11 Titik K



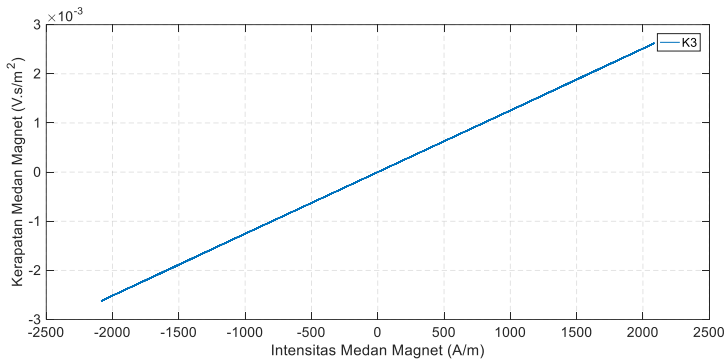
(a)



(b)

Gambar 4.45 Bentuk kurva histerisis di titik K₁ (a); K₂ (b); dan K₃ transformator laminasi 0,03 cm

Pada titik K₁ nilai B_{\max} adalah sebesar 1,157 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,157 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,797 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 3.368,686 A/m, nilai H_{\min} sebesar -3.368,686 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1,388,726 A/m. K₂ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 1,190 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -1,190 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,818 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 3.646,511 A/m, nilai H_{\min} sebesar -3.646,511 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.472,501 A/m. K₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,003 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,003 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,002 V.s/m².



(c)

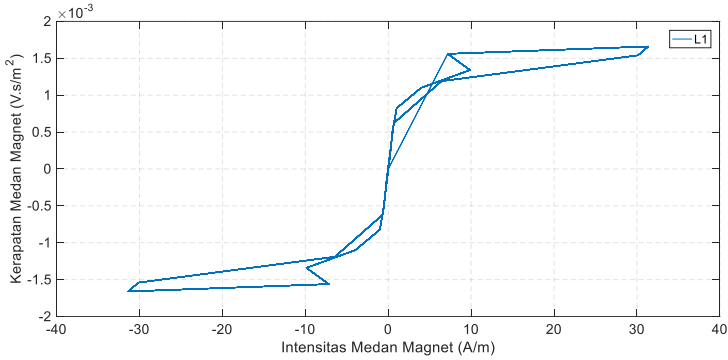
Gambar 4.45 Bentuk kurva histeresis di titik K₁ (a); K₂ (b); dan K₃ transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

Pada titik monitor K, terdapat sedikit perbedaan antara K₁ dengan K₂, yaitu pada nilai intensitas medan magnet, dimana K₂ memiliki nilai lebih besar, yaitu 3.646,511 A/m. Sedangkan kurva histeresis pada titik monitor K₃ memiliki besar kerapatan medan magnet yang sangat kecil seperti kurva-kurva sebelumnya. Sehingga bentuk kurva histeresisnya mendekati garis linier.

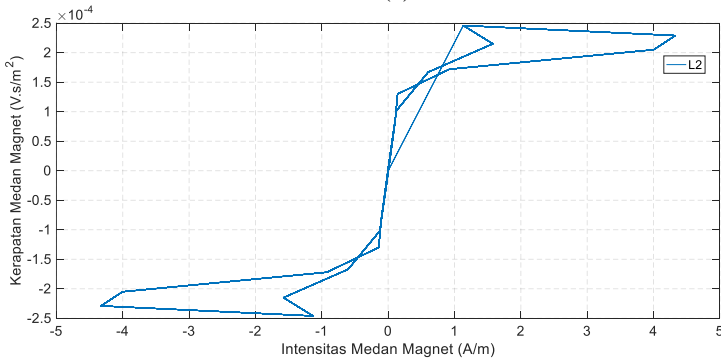
Tabel 4.39 Nilai B-H di titik K transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
K ₁	1,157	0,797	3.368,686	1.388,726
K ₂	1,190	0,818	3.646,511	1.472,501
K ₃	0,003	0,002	2.083,812	1.368,070

4.2.3.12 Titik L



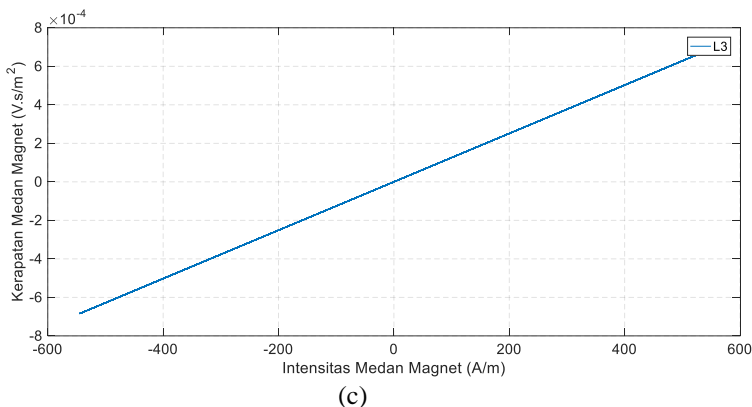
(a)



(b)

Gambar 4.46 Kurva histerisis di titik L₁ (a); L₂ (b); dan L₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm

Pada titik L₁ nilai B_{\max} adalah sebesar 0,002 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,002 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,001 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 31,364 A/m, nilai H_{\min} sebesar -31,364 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 9,134 A/m. L₂ memiliki nilai B_{\max} dan H_{\max} yang cenderung kecil dibandingkan kedua titik lainnya. L₃ memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar 0,001 V.s/m² dan nilai B_{\min} sebesar -0,001 V.s/m² dengan nilai rerata absolut 0,00032 V.s/m². Nilai H_{\max} adalah sebesar 544,633 A/m, nilai H_{\min} sebesar -544,633 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 351,894 A/m.

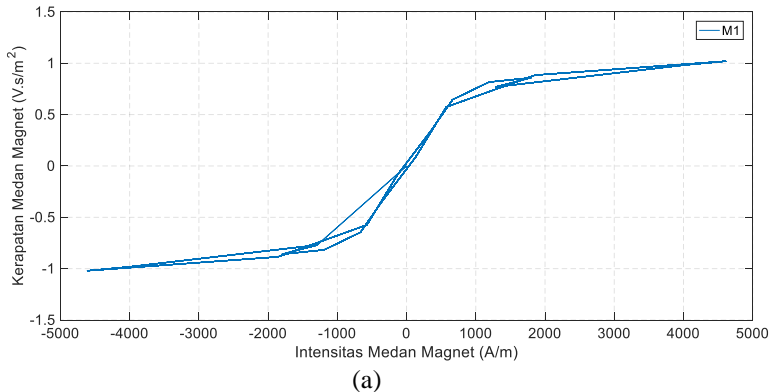


Gambar 4.46 Kurva histerisis di titik L₁ (a); L₂ (b); dan L₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm

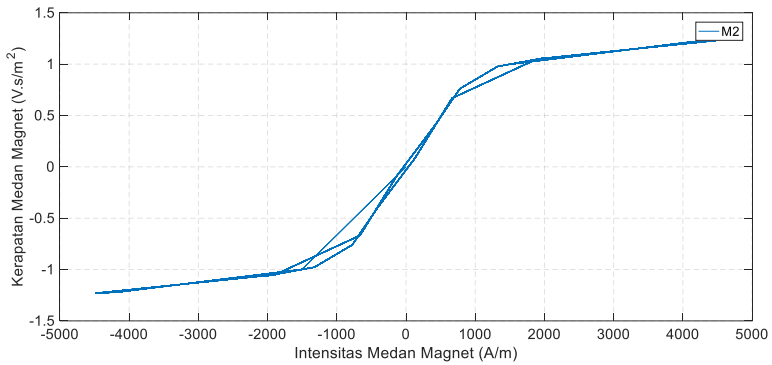
Tabel 4.40 Nilai B-H di titik L transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
L ₁	0,002	0,001	31,364	9,134
L ₂	0,000	0,000	4,329	1,296
L ₃	0,001	0,000	544,633	351,894

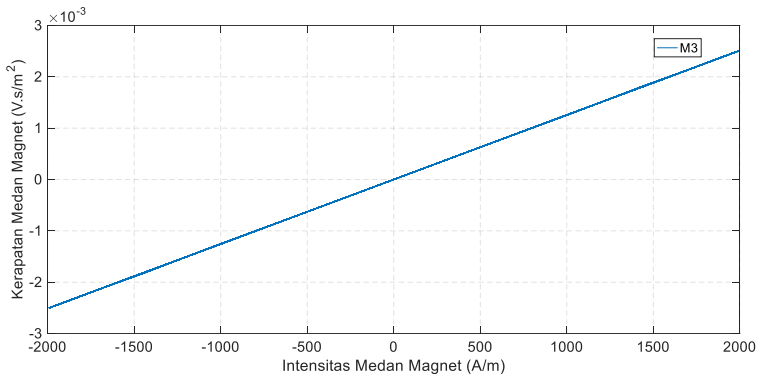
4.2.3.13 Titik M



Gambar 4.47 Kurva histerisis di titik M₁ (a); M₂ (b); dan M₃ (c) transformator laminasi 0,03 cm



(b)



(c)

Gambar 4.47 Kurva histerisis di titik M_1 (a); M_2 (b); dan M_3 (c) transformator laminasi 0,03 cm (lanjutan)

Pada titik M_1 nilai B_{\max} adalah sebesar $1,021 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,021 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,699 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $4.610,341 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-4.610,341 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $1.648,676 \text{ A/m}$. M_2 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $1,232 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-1,232 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,846 \text{ V.s/m}^2$. Nilai H_{\max} adalah sebesar $4.478,494 \text{ A/m}$, nilai H_{\min} sebesar $-4.478,494 \text{ A/m}$, dan nilai rerata absolutnya adalah $4.478,494 \text{ A/m}$. M_3 memiliki nilai B_{\max} adalah sebesar $0,003 \text{ V.s/m}^2$ dan nilai B_{\min} sebesar $-0,003 \text{ V.s/m}^2$ dengan nilai rerata absolut $0,002 \text{ V.s/m}^2$.

Nilai H_{\max} adalah sebesar 1.990,389 A/m, nilai H_{\min} sebesar -1.990,389 A/m, dan nilai rerata absolutnya adalah 1.314,749 A/m. Kurva histerisis di titik M_1 dan M_2 hampir memiliki bentuk yang sama. Namun, M_2 memiliki nilai B yang lebih tinggi. Sedangkan untuk kurva histerisis di titik M_3 , nilai intensitas medan magnetnya jauh lebih besar daripada nilai kerapatan medan magnetnya yang menyebabkan bentuk kurva histerisisnya menyerupai garis linier. Tabel 4.41 menunjukkan ringkasan nilai B-H di titik M.

Tabel 4.41 Nilai B-H di titik M transformator laminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B_{\max} (V.s/m ²)	$ B_{\text{avg}} $ (V.s/m ²)	H_{\max} (A/m)	$ H_{\text{avg}} $ (A/m)
M_1	1,021	0,699	4.610,341	1.648,676
M_2	1,232	0,846	4.478,494	1.734,247
M_3	0,003	0,002	1.990,389	1.314,749

Pada transformator dengan laminasi 0,03 cm, nilai kerapatan medan magnet terbesar B_{\max} berada pada titik I_2 , sebesar 2,174 V.s/m². Kemudian rerata absolut B_{avg} berada pada titik J_2 yakni sebesar 1,517 V.s/m². Sedangkan untuk nilai intensitas medan magnet terbesar sekaligus rerata absolutnya berada pada titik I_2 , yaitu masing-masing sebesar 40.821,324 A/m serta 12.045,989 A/m. Tabel 4.42 menunjukkan ringkasan keseluruhan. Terlihat bahwa titik tersebut sudah melebihi batas saturasi kurva magnetisasi material baja ST-37.

Tabel 4.42 Ringkasan nilai B-H pada masing-masing titik pada transformator berlaminasi 0,03 cm

Titik Monitor	B _{max} (V.s/m ²)	B _{avg} (V.s/m ²)	H _{max} (A/m)	H _{avg} (A/m)
A ₁	0,981	0,771	1.279,411	906,514
A ₂	1,010	0,796	1.518,973	1.015,774
A ₃	0,002	0,001	1.717,311	1.157,648
B ₁	0,001	0,000	3,910	1,780
B ₂	0,000	0,000	0,120	0,037
B ₃	0,001	0,000	3,910	1,780
C ₁	1,133	0,879	2.790,235	1.589,130
C ₂	1,022	0,813	1.734,674	1.118,112
C ₃	0,002	0,001	1.716,698	1.164,968
D ₁	1,855	1,457	9.305,151	4.902,851
D ₂	1,854	1,457	9.290,094	4.893,539
D ₃	0,011	0,007	8.524,028	5.184,496
E ₁	1,854	1,456	9.264,081	4.879,309
E ₂	1,854	1,457	9.285,117	4.892,960
E ₃	0,010	0,006	8.351,012	5.056,856
F ₁	1,097	0,540	1.127,438	543,931
F ₂	1,100	0,541	1.131,549	546,370
F ₃	0,001	0,001	1.186,226	581,096
G ₁	0,002	0,001	6,071	2,481
G ₂	0,002	0,001	2,846	1,128
G ₃	0,000	0,000	126,103	82,415
H ₁	1,100	0,563	1.131,632	582,399
H ₂	1,078	0,528	1.101,659	531,374
H ₃	0,001	0,001	1.124,949	543,417
I ₁	2,172	1,516	40.524,028	11.989,474
I ₂	2,174	1,516	40.821,324	12.045,989
I ₃	0,010	0,006	8.150,746	5.138,709
J ₁	2,172	1,516	40.512,178	11.987,732
J ₂	2,171	1,517	40.423,021	11.980,334
J ₃	0,010	0,006	8.128,970	5.125,339
K ₁	1,157	0,797	3.368,686	1.388,726
K ₂	1,190	0,818	3.646,511	1.472,501
K ₃	0,003	0,002	2.083,812	1.368,070
L ₁	0,002	0,001	31,364	9,134
L ₂	0,000	0,000	4,329	1,296
L ₃	0,001	0,000	544,633	351,894
M ₁	1,021	0,699	4.610,341	1.648,676
M ₂	1,232	0,846	4.478,494	1.734,247
M ₃	0,003	0,002	1.990,389	1.314,749

4.2.4 Analisis Kejenuhan Inti Transformator

Dari titik-titik monitor tersebut, dapat terlihat bahwa pada simulasi laminasi inti 0,03 cm terdapat beberapa titik yang telah melewati batas saturasi material inti transformator. Dari titik-titik tersebut diambil titik dominan pada masing-masing kaki dan dapat dikaitkan oleh besarnya arus *inrush*.

$$|i_{peak}| = \frac{\sqrt{2} V_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \left(\frac{2 \cdot B_N + B_R - B_S}{B_N} \right) \quad [15] \quad (4.1)$$

dengan: V_m = Tegangan maksimum yang terpasang (V)
 L = Induktansi sela udara (H)
 R = Resistansi belitan (Ohm)
 B_N = Kerapatan fluks saat melaju normal
 B_R = Kerapatan fluks sisa
 B_S = Kerapatan fluks saat saturasi

Pada titik C₁ (kaki kiri) transformator dengan ketebalan laminasi 0,03 cm, didapatkan nilai B_N sebesar 0,0177 V.s/m², B_R sebesar 0,0002 V.s/m², dan B_S sebesar 1,133 V.s/m². Sehingga didapatkan nilai puncak arus *inrush* sebesar:

$$|i_{peak}| = \frac{\sqrt{2} (\sqrt{2} 380)}{5.905,39} \left(\frac{2(0,0177) + (0,0002) - (1,133)}{0,0177} \right)$$

$$|i_{peak}| = 8,49 \text{ A.}$$

Pada titik H₁ (kaki tengah) transformator dengan ketebalan laminasi 0,03 cm, didapatkan nilai B_N sebesar 0,00923 V.s/m², B_R sebesar 0,0067 V.s/m², dan B_S sebesar 1,100 V.s/m². Sehingga didapatkan nilai puncak arus *inrush* sebesar:

$$|i_{peak}| = \frac{\sqrt{2} (\sqrt{2} 380)}{5.903,992} \left(\frac{2(0,00923) + (0,0078) - (1,100)}{0,00923} \right)$$

$$|i_{peak}| = 15,5 \text{ A.}$$

Pada titik M₁ (kaki kanan) transformator dengan ketebalan laminasi 0,03 cm, didapatkan nilai B_N sebesar 0,0224 V.s/m², B_R sebesar

0,00089 V.s/m², dan B_S sebesar 1,232 V.s/m². Sehingga didapatkan nilai puncak arus *inrush* sebesar:

$$|i_{peak}| = \frac{\sqrt{2} (\sqrt{2} 380)}{5.905,39} \left(\frac{2(0,0224) + (0,00089) - (1,232)}{0,0224} \right)$$

$$|i_{peak}| = 7,33 \text{ A.}$$

Tabel 4.43 Nilai puncak arus *inrush* transformator tiga fasa asimetris berdasarkan pendekatan simulasi

Titik Monitor	Arus Puncak <i>Inrush</i> (A)
C ₁ (kaki kiri)	8,49 A
H ₁ (kaki tengah)	15,5 A
M ₁ (kaki kanan)	7,33 A

Dari Tabel 4.43 dapat terlihat bahwa arus *inrush* terbesar berada pada kaki bagian tengah. Namun, pendekatan simulasi ini harus dibuktikan dengan hasil pengujian untuk dibandingkan seberapa besar *margin-error*-nya, mengingat kurva histerisis di titik monitor kaki transformator dengan ukuran terbesar memiliki bentuk menyerupai garis linier atau belum menyentuh titik saturasi dan banyak parameter sistem tenaga listrik yang diabaikan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai bentuk kurva histerisis pada transformator tiga fasa asimetris akibat variasi ketebalan inti laminasi, maka:

1. Rerata absolut besar kerapatan medan magnet dan intensitas medan magnet tertinggi berada di titik D, E, I, dan J yang berarti keempat lokasi tersebut berada pada jalur percabangan aliran distribusi fluks.
2. Pada sumbu $z=10$, nilai kerapatan medan magnetnya fluktuatif, sehingga bentuk kurva histerisis dapat dijumpai dalam bentuk menyerupai garis linier.
3. Nilai kerapatan medan magnet terbesar berada pada transformator dengan laminasi 0,03 cm, yaitu sebesar 2,174 V.s/m².
4. Kerapatan medan magnet dengan rerata absolut tertinggi berada pada transformator dengan inti tanpa laminasi, yaitu sebesar 1,837 V.s/m².
5. Pada titik percabangan potongan inti transformator dengan ketebalan laminasi 0,03 cm memiliki nilai intensitas medan magnet tertinggi dibanding transformator tanpa laminasi dan laminasi 2,5 cm.
6. Melalui pendekatan simulasi, elemen penyusun kurva histerisis dapat mempengaruhi nilai arus *inrush*. Namun, masih terdapat faktor impedansi transformator dan keberadaan fluks sisa yang mempengaruhi nilai arus *inrush*. Arus *inrush* pada kaki tengah transformator tiga fasa asimetris memiliki nilai arus *inrush* lebih tinggi dibandingkan dua kaki di sisi samping transformator.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian berikutnya adalah untuk melakukan eksperimen pada transformator tiga fasa asimetris berdasarkan simulasi dengan variabel cara pemotongan inti serta pemilihan jenis material bahan penyusun inti transformator. Penelitian ini juga dapat dikembangkan untuk bahan penelitian arus *inrush* dan pengaruh saturasi inti material transformator terhadap harmonisa.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals: Fourth Edition*, 4 ed. McGraw-Hill Education, 2005.
- [2] P. S. Moses, M. A. S. Masoum, dan H. A. Toliyat, "Dynamic Modeling of Three-Phase Asymmetric Power Transformers With Magnetic Hysteresis: No-Load and Inrush Conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 4, hlm. 1040–1047, Des 2010.
- [3] J. A. Martinez *dkk.*, "Modeling and Analysis Guidelines for Slow Transients—Part III: The Study of Ferroresonance," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 15, no. 1, hlm. 11, 2000.
- [4] A. V. Radun, "Development of Dynamic Magnetic Circuit Models Including Iron Saturation and Losses," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 5, hlm. 1–10, Mei 2014.
- [5] K. Dezelak, M. Petrun, M. Roser, D. Dolinar, dan G. Stumberger, "The Impact of Iron Core Model on Dynamic Behavior of Three-Phase Power Transformer Dynamic Model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 1, hlm. 1–4, Jan 2015.
- [6] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, H. K. Hoidalen, A. Lotfi, N. Chiesa, dan C. M. Arturi, "Practical Experience in Using a Topological Model of a Core-Type Three-Phase Transformer—No-Load and Inrush Conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 4, hlm. 2081–2090, Agu 2017.
- [7] S. Ruangsinchaiwanich dan K. Khongseepai, "Investigation of transformer performance by the finite element method," 2009, hlm. 1–6.
- [8] A. B. Ksatria, I. M. Y. Negara, D. C. Riawan, D. A. Asfani, dan D. Fahmi, "Core-cutting topology effects of single phase 1-KVA transformer on inrush current," 2017, hlm. 144–147.
- [9] O. Touhami dan F. Aboura, "Integration of the hysteresis in models of asymmetric three-phase transformer: finite-element and dynamic electromagnetic models," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 7, hlm. 614–622, Agu 2016.
- [10] A. Rezaei-Zare, R. Irvani, dan M. Sanaye-Pasand, "Impacts of Transformer Core Hysteresis Formation on Stability Domain of Ferroresonance Modes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, hlm. 177–186, Jan 2009.

- [11] P. S. Moses, M. A. S. Masoum, dan M. Moghbel, "Effects of iron-core topology on inrush currents in three-phase multi-leg power transformers," 2012, hlm. 1–6.
- [12] M. Khelil dan M. Elleuch, "Modeling of the Air-Gaps of Overlapped Joints in Three-Phase Transformer Iron core for using by FEM," dipresentasikan pada 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signal, and Devices, 2009, hlm. 1–6.
- [13] B. L. Tobing, *Peralatan Tegangan Tinggi: Edisi Kedua*, 2 ed. Erlangga, 2012.
- [14] P. H. Sudargo dan J. R. S. Baki, "Pengaruh Filler dan Arus Listrik Terhadap Sifat Fisik-Mekanik Sambungan Las Gmaw Logam Tak Sejenis Antara Baja Karbon dan J4", hlm. 6, 2015.
- [15] F. Mekic, R. Girgis, Z. Gajic, dan E. teNyenhuis, "Power Transformer Characteristics and Their Effects on Protective Relays," 2007, hlm. 455–466.

BIODATA PENULIS



Muhammad Sulthon Novera Rega, lahir di Kabupaten Batang, 16 Mei 1996. Riwayat pendidikan penulis dimulai di SD Negeri Proyonanggan 11 Batang, lulus pada tahun 2008. Kemudian penulis melanjutkan studinya di SMP Negeri 2 Pekalongan, lulus pada tahun 2011, serta menamatkan bangku sekolah menengah di SMA Negeri 1 Pekalongan pada tahun 2014. Alhamdulillah, penulis diterima di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa mengenyam pendidikan tinggi, penulis pernah aktif di ranah organisasi sebagai staff Kementerian Pemuda dan Kebangsaan BEM ITS 2015/2016 dan Wakil Kepala Departemen Keprofesian HIMATEKTRO ITS 2016/2017. Selain di ranah organisasi, penulis juga tercatat sebagai salah satu asisten Laboratorium Tegangan Tinggi serta berpartisipasi aktif dalam berbagai kegiatan di bidang keilmiah baik skala nasional hingga internasional. Penulis dapat dihubungi melalui email: sulthonnovera@hotmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)